

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería Aeroespacial

### Evaluación de Structure from Motion en el levantamiento de piezas industriales simples

Autor: Mario Espejo Arco

Tutora: Cristina Torrecillas Lozano

**Dpto. Ingeniería Gráfica**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Departamento de  
**Ingeniería Gráfica**



Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Aeroespacial

# **Evaluación de Structure from Motion en el levantamiento de piezas industriales simples**

Autor:  
Mario Espejo Arco

Tutora:  
Cristina Torrecillas Lozano  
Profesora titular

Dpto. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2018





Proyecto Fin de Carrera: Evaluación de Structure from Motion en el levantamiento de piezas industriales simples

Autor: Mario Espejo Arco

Tutor: Cristina Torrecillas Lozano

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

Este documento no habría visto la luz sin el trabajo de varias personas y colectivos, incluso ajenos a la escuela. Es por esto que, en primer lugar, quería darles las gracias a todos aquellos que han contribuido de alguna forma u otra al desarrollo de este documento: a la empresa FARO de medición y escaneo y su amable representante Antonio Capel, a Antonio Miguel Pérez Romero del departamento de Ingeniería Gráfica de la ETSIA por su acogida y ayuda aportada, al representante del escáner láser Antonio, al equipo automovilístico ARUS y a Sergio Estéban Roncero por su tiempo, y en especial a mi tutora Cristina Torrecillas Lozano por ofrecerme la posibilidad de desarrollar mi trabajo en un tema de gran interés personal y confiar en mí.

También quería agradecer el apoyo de mis compañeros Diego y Guillermo, los cuales se han convertido en un pilar fundamental de mi vida, y de mis padres por sus ánimos y su comprensión, a pesar de las dificultades que hemos vivido recientemente.

A todos, gracias.

*Mario Espejo Arco*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

El presente documento pretende ser un estudio del software de fotogrametría PhotoScan, de la compañía rusa Agisoft, para probar su posible empleo en la recreación 3D de piezas industriales pequeñas. Para ello, se comienza el documento recogiendo los conceptos básicos de diferentes técnicas de escaneado, con el objetivo final de obtener un conjunto geométrico tridimensional a partir de un modelo real. Así, se abordan técnicas de escaneado láser a las que se han tenido acceso durante el desarrollo del trabajo (el escaneado láser con brazo articulado, con proyección desde estación fija o con proyección desde un láser de mano) con el objeto de tener una base conceptual acerca de dichas técnicas que permita poder compararlas entre sí y con la técnica de fotogrametría.

En segundo lugar, se exponen las piezas empleadas en el estudio, la instrumentación y software empleado, para pasar a la elección de la metodología, añadiendo comentarios y ejemplos de cómo actuar para obtener mejores resultados en cualquiera de los pasos del flujo de trabajo típico del programa o *workflow*, haciendo una guía paso a paso de cómo digitalizar un modelo, desde la toma de datos a la exportación de la geometría tridimensional.

Finalmente, para cerrar el documento se presentan los resultados y las comparativas de los modelos finales mediante la solidificación de las piezas en CATIA V5 en las que basar las conclusiones del estudio presentado. Se concluye que la técnica de la fotogrametría ofrece resultados muy potentes y rápidos y, aunque los resultados cuenten con una gran cantidad de polígonos y presenten un gran detalle, su aplicación para mediciones precisas de pequeña escala en trabajos industriales se ve superada por las técnicas láser de precisión como el escaneado con sonda y brazo articulado. Sin embargo, su facilidad y asequibilidad hacen que resulte un proceso de gran interés para industrias como la del cine o el videojuego, ya que se consiguen modelos de gran detalle y con texturas de gran calidad debido al uso de las propias fotografías.





# Abstract

---

This paper pretends to be a presentation for the photogrammetry software PhotoScan, from the Russian company Agisoft. It shows some of the possibilities of this software, making a step by step guide about how to recreate a complete 3D model, from the data acquisition to the exportation of the 3D geometry.

First of all, it summarizes the basic concepts of different scanning techniques, with the final goal of obtaining a 3D geometrical set from a real model. Thus, it presents some 3D scanning techniques based on laser that have been tested during the development of this project (laser scanning with probe and articulated arm, projection from a static station or from a hand laser), trying to establish a conceptual basis about these techniques that makes possible comparisons between them and with photogrammetry.

Later on, the document, it is approached the previously commented photogrammetry subject, adding commentaries and examples of how to proceed in order to obtain better results in any of the steps in the workflow that the software offers.

To close the document, it is added a chapter about conclusions thanks to the results obtained from the research of the different scanning methods. It is concluded that the photogrammetry techniques offer very powerful and quick results and, although these results present a large quantity of polygons and geometry, and show a high level of detail, other laser precision techniques like a laser probe with an articulated arm (FaroArm is used in this document) excel when working with precise measurements at a small scale. Nevertheless, the ease and affordability that offers photogrammetry makes it an interesting technique for industries like videogames or cinema, since it can obtain high detail models with high quality textures due to the use of photography.

An appendix is added at the end of the text about the solidifying and scaling process made to the meshes that were obtained through photogrammetry and high precision laser scanning. This task is meant to being able to compare both solids, since materials can be applied on the models, and calculate their masses and centers of gravity.



El presente trabajo nace de un interés personal hacia el software de diseño 3D, sumado a mi propio desconocimiento acerca del mundo del escaneado digital de modelos, que se plantea como una tecnología de gran interés ingenieril, y que está consiguiendo hacerse un hueco en la industria debido a la modernización de los medios y de los procesos que estamos viviendo.

Empiezo por mi propia historia. Desde pequeño me ha llamado especialmente la atención todo lo que presenta cualquier relación con el mundo del dibujo y las representaciones gráficas. Empecé joven, con unos 9 o 10 años, a interesarme por todo tipo de softwares de representación y modelado 3D: desde el gratuito *Wings 3D* ([‘http://www.wings3d.com/’](http://www.wings3d.com/)), *Blender* ([‘https://www.blender.org/’](https://www.blender.org/)) o antiguas versiones de *Google SketchUp* ([‘https://www.sketchup.com/es’](https://www.sketchup.com/es)), que tanto tiempo me hizo invertir, que me descubrió una nueva pasión que aun no conocía y que recomiendo encarecidamente a todo aquel que quiera iniciarse en este mundo del modelado digital. Ya en la carrera, he descubierto una cara más seria e ingenieril de esta disciplina con *CATIA* ([‘https://www.3ds.com/products-services/catia/’](https://www.3ds.com/products-services/catia/)) que ha alimentado mi pasión por la ingeniería.

Es por esto que, al tener que plantear el tema del Trabajo, tuve claro desde un principio que mi ilusión era buscarlo en el Departamento de Ingeniería Gráfica de la escuela. El tema de la fotogrametría se me presenta ideal, pues, aparte de guardar una estrecha relación con el modelado 3D, era algo que desconocía totalmente, lo cual lo hacía aun más interesante.

La tecnología de la fotogrametría consigue acercar los mundos de la ingeniería, la ciencia y el arte. Así, esta técnica resulta particularmente útil en campos como la ingeniería inversa, la topografía, la geología, o los proyectos *as built*, aquellos realizados sobre situaciones reales, como el estudio de deformaciones o la evolución temporal de un objeto, y en trabajos de otra índole como el registro de obras de patrimonio cultural tales como esculturas o edificios. Últimamente también se puede comprobar utilizándose en videojuegos o películas, donde crear el modelo resulta más demandante en términos de esfuerzo y tiempo que escanearlos en formato digital.

La creciente popularidad de la fotogrametría se debe fundamentalmente al desarrollo de la potencia computacional, que ha hecho que, desde hace unos años, se puedan obtener modelos con una resolución competitiva en tiempos de computación asequibles.



<b>Agradecimientos</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Motivación</b>	<b>vii</b>
<b>Índice</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>11</b>
1.1 <i>El deseo por documentar la realidad</i>	11
1.2 <i>La fotogrametría: structure from motion</i>	12
1.3 <i>El escaneado 3D: evolución histórica</i>	15
1.4 <i>Escaneado láser</i>	15
1.5 <i>Objetivo</i>	17
<b>2 Datos de partida</b>	<b>19</b>
2.1 <i>Modelos</i>	19
2.2 <i>Instrumentación</i>	20
2.2.1 <i>Hardware</i>	20
2.2.2 <i>Software</i>	20
2.2.3 <i>Escáneres láser</i>	21
<b>3 Metodología General</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Structure from motion</i>	23
3.1.1 <i>Preparación de piezas y toma de fotografías</i>	23
3.1.2 <i>Flujo de trabajo</i>	25
3.2 <i>Medición y escaneado láser</i>	26
3.2.1 <i>Brazo articulado: FARO Quantum<sup>s</sup></i>	26
3.2.2 <i>Medición láser desde estación fija: Leica ScanStation P16</i>	27
3.2.3 <i>Láser de mano: GeoSLAM ZEB-REVO RT</i>	28
<b>4 Levantamiento 3D mediante fotogrametría de una pieza mecánica</b>	<b>31</b>
3.1. <i>Creación de chunks y adición de fotografías</i>	31
4.1.1 <i>Creación de chunks</i>	31
4.1.2 <i>Adición de fotografías</i>	32
4.1.3 <i>Aplicación de máscaras</i>	33
4.2 <i>Alineación de fotografías y generación de la nube de puntos preliminar</i>	34
4.2.1 <i>Alineación de cámaras</i>	35
4.2.2 <i>Filtrado de puntos en la nube dispersa</i>	41
4.3 <i>Creación y procesado de la nube de puntos</i>	43
4.3.1 <i>Generación de la nube densa de puntos</i>	43
4.3.2 <i>Limpieza de la nube densa de puntos</i>	47
4.3.3 <i>Alineación de los chunks</i>	49
4.3.4 <i>Unión de los chunks</i>	52
4.4 <i>Creación del Mallado</i>	53
4.5 <i>Generación de texturas</i>	55

4.6	<i>Exportación del modelo</i>	57
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>59</b>
5.1	<i>Pieza 1</i>	59
5.1.1	SfM: Agisoft PhotoScan	59
5.1.2	Escáner láser fijo	60
5.2	<i>Pieza 2</i>	61
5.2.1	SfM: Agisoft PhotoScan	61
5.2.2	Escáner láser fijo	62
5.2.3	Escáner láser con brazo articulado	62
5.3	<i>Pieza 3</i>	63
5.3.1	SfM: Agisoft PhotoScan	63
5.3.2	Escáner láser con brazo articulado	64
<b>6</b>	<b>Validación de resultados</b>	<b>65</b>
6.1	<i>Mallado de piezas</i>	65
6.1.1	Pieza 3: mallado desde láser FARO	65
6.1.2	Pieza 2: PhotoScan	72
6.2	<i>Comparativa en CATIA V5</i>	82
6.2.1	Pieza 1	82
6.2.2	Pieza 2	83
6.2.3	Pieza 3	84
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>87</b>
	<b>Referencias</b>	<b>89</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Primera fotografía de la historia, tomada por Joseph Nicéphore Niépce en 1826 [1]	11
Figura 2: Uso de drones en estudios fotogramétricos [4]	12
Figura 3: Fotografías que contribuyen a la reconstrucción de un punto en el entorno tridimensional [5]	13
Figura 4: Trípode motorizado de 10m de altura para estudio fotogramétrico [7]	13
Figura 5: SfM, identificación de puntos homólogos entre diversas fotografías [2]	14
Figura 6: Escáner láser de escritorio Smart3D [11]	16
Figura 7: Asiento del coche ARUS y nube de puntos de escáner láser de mano	16
Figura 8: Motor J85-GE-13 y nube de puntos de escáner láser de mano	17
Figura 9: Pieza 1	19
Figura 10: Pieza 2	19
Figura 11: Pieza 3	19
Figura 12: FARO Quantum <sup>S</sup> con trípode y sonda manual en el extremo del brazo	21
Figura 13: Escáner láser LEICA ScanStation P16	22
Figura 14: Láser de mano el ZEB-REVO RT [16] [17]	22
Figura 15: Búsqueda de nitidez en la parte más cercana a la cámara	23
Figura 16: Búsqueda de nitidez en la parte más alejada de la cámara	23
Figura 17: Estación de fotogrametría profesional para escaneos de cuerpo completo [18]	24
Figura 18: Posiciones de las cámaras usando una mesa rotatoria	24
Figura 19: Posiciones de las cámaras sin el uso de mesa giratoria	24
Figura 20: Flujo de trabajo típico de SfM	25
Figura 21: Calibrado del escáner láser con brazo articulado	26
Figura 22: Proceso de escaneo superficial usando el láser FARO	26
Figura 23: Medición y localización de los <i>targets</i> usando la estación total	27
Figura 24: Dianas ( <i>targets</i> ) utilizados	27
Figura 25: Previsualización del escaneado desde escáner láser fijo	28
Figura 26: Nube de puntos típica de un láser de mano, del interior de un edificio	28
Figura 27: Nube de puntos obtenida en el escaneo del sillón ARUS (arriba) y del motor J85-GE-13 (abajo)	29
Figura 28: Configuración para el <i>chunk</i> 1	31
Figura 29: Configuración para el <i>chunk</i> 2	31
Figura 30: Proceso de adición de <i>chunks</i>	32
Figura 31: Proceso de renombramiento de <i>chunks</i>	32
Figura 32: Proceso de adición de fotografías	33
Figura 33: Máscara <i>Alpha</i> en una imagen	33
Figura 34: Ventana <i>Import Mask</i>	34
Figura 35: Proceso de flujo de trabajo o <i>workflow</i> típico de PhotoScan	34

Figura 36: Ventana <i>Align Photos</i>	35
Figura 37: Al no rotar el fondo, si no simplemente la pieza, este no es de interés a la hora de alinear las fotografías	35
Figura 38: Alineación de las cámaras (izq.) y nube de puntos dispersa (dcha.) del <i>chunk</i> superior	36
Figura 39: Alineación de las cámaras (izq.) y nube de puntos dispersa (dcha.) del <i>chunk</i> inferior	36
Figura 40: Alineación de las fotografías tomadas haciendo uso de una mesa giratoria	37
Figura 41: Crear y renombrar un marcador	38
Figura 42: Determinación del marcador “18”, ya creado.	38
Figura 43: Panel <i>Photos</i> tras la localización de un marcador	38
Figura 44: Marcador “18” en el espacio tridimensional	39
Figura 45: <i>Align Selected Cameras</i>	39
Figura 46: Nubes de puntos dispersas del <i>chunk</i> superior (izq.) y <i>chunk</i> inferior (dcha.) con precisión media	40
Figura 47: Nubes de puntos dispersas del <i>chunk</i> superior (izq.) y <i>chunk</i> inferior (dcha.) con precisión baja	40
Figura 48: Gráfica n° puntos y tiempo frente a calidad para el <i>chunk</i> superior	40
Figura 49: Gráfica n° puntos y tiempo frente a calidad para el <i>chunk</i> inferior	41
Figura 50: Filtro <i>Reprojection error</i>	42
Figura 51: Filtro <i>Reconstruction uncertainty</i>	42
Figura 52: Filtro <i>Image count</i>	43
Figura 53: Herramientas de transformación del prisma delimitador	44
Figura 54: Confinado del modelo en el prisma delimitador	44
Figura 55: Ventana <i>Build Dense Cloud</i>	45
Figura 56: <i>Ultra High / Mild</i>	46
Figura 57: <i>Ultra High / Moderate</i>	46
Figura 58: <i>Ultra High / Aggressive</i>	46
Figura 59: Relación n.º de puntos y tiempo frente a la calidad del proceso	47
Figura 60: Selección rectangular	47
Figura 61: Selección de forma libre	48
Figura 62: Selección circular	48
Figura 63: Deselección de puntos no deseados usando la tecla <i>Shift</i>	48
Figura 64: Limpieza de puntos en ambos <i>chunks</i>	49
Figura 65: Ventana <i>Align Chunks</i>	50
Figura 66: Orientación del <i>chunk</i> superior	50
Figura 67: Orientación del <i>chunk</i> inferior	51
Figura 68: Fotografía de la pieza 3 con marcadores posicionados	51
Figura 69: Ambos <i>chunks</i> con los mismos marcadores tras alinearlos	52
Figura 70: Ventana <i>Merge chunks</i>	52
Figura 71: Nube de puntos final	53
Figura 72: Ventana <i>Build Mesh</i>	53
Figura 73: Mallado final	55



Figura 74: Nube de puntos en el agujero interior	55
Figura 75: Geometría del agujero interior	55
Figura 76: Ventana <i>Build Texture</i>	56
Figura 77: Modelo final texturizado	57
Figura 78: Opción exportar modelo	57
Figura 79: Fotografías en la pieza 1 (237 en total)	59
Figura 80: Modelo con y sin textura de la pieza 1	60
Figura 81: Pieza a escanear (izquierda) y nube de puntos (derecha)	60
Figura 82: Fotografías en la pieza 2 (161 en total)	61
Figura 83: Modelo con y sin textura de la pieza 2	61
Figura 84: Pieza a escanear (izquierda) y nube de puntos (derecha)	62
Figura 85: Modelo de la pieza 2	62
Figura 86: Detalle de los agujeros de la pieza 2	63
Figura 87: Fotografías en la pieza 2 (161 en total)	63
Figura 88: Modelo con y sin textura de la pieza 3	64
Figura 89: Modelo de la pieza 3	64
Figura 90: Entorno de CAD Exchanger	65
Figura 91: Inserción del mallado como nuevo componente <i>body</i>	66
Figura 92: Situación del mallado en el entorno de Fusion360	66
Figura 93: Opción <i>Edit</i> del menú desplegable con click derecho	67
Figura 94: Limpieza del mallado	67
Figura 95: Herramienta <i>Make Closed Mesh</i>	67
Figura 96: Parámetros de la herramienta de cerrado de mallados	68
Figura 97: Importación del mallado como archivo .stl	68
Figura 98: Importación del mallado en el entorno de CATIA	68
Figura 99: Módulo <i>DMU Optimizer</i>	69
Figura 100: Herramienta <i>Offset</i>	69
Figura 101: Herramienta <i>Offset</i> y ventana de guardado de la geometría resultante	69
Figura 102: Copia del <i>MASTER</i> a un nuevo <i>CatPart</i>	70
Figura 103: Módulo <i>Generative Shape Design</i> (izda.) y herramienta <i>Join</i> (dcha.)	70
Figura 104: Error de cohesión en el mallado y localización de dominios inconexos	71
Figura 105: Herramienta <i>Close Surface</i>	71
Figura 106: Se ocultan las superficies en <i>Join 1</i> para mostrar el modelo sólido	72
Figura 107: Sección de la pieza en CATIA	72
Figura 108: Inserción del mallado como nuevo componente <i>body</i>	73
Figura 109: Situación del mallado en el entorno de Fusion360	73
Figura 110: Opción <i>Edit</i> del menú desplegable con click derecho	74
Figura 111: Herramienta <i>Make Closed Mesh</i>	74
Figura 112: Parámetros de la herramienta de cerrado de mallados	74
Figura 113: Herramienta <i>Remesh</i> (izda.) y parámetros (dcha.)	75

Figura 114: Reducción de la densidad del mallado	75
Figura 115: Herramienta <i>Create Mesh Section</i>	76
Figura 116: <i>Sketch</i> sobre la sección del modelo	76
Figura 117: Herramienta <i>Measure</i>	77
Figura 118: Herramienta <i>Scale</i>	77
Figura 119: Importación del mallado como archivo .stl	77
Figura 120: Importación del mallado en el entorno de CATIA	78
Figura 121: Módulo <i>DMU Optimizer</i>	78
Figura 122: Herramienta <i>Offset</i>	78
Figura 123: Herramienta <i>Offset</i> y ventana de guardado de la geometría resultante	79
Figura 124: Copia del <i>MASTER</i> a un nuevo <i>CatPart</i>	79
Figura 125: Módulo <i>Generative Shape Design</i> (izda.) y herramienta <i>Join</i> (dcha.)	80
Figura 126: Error de cohesión en el mallado y localización de dominios inconexos	80
Figura 127: Herramienta <i>Close Surface</i>	81
Figura 128: Se ocultan las superficies en <i>Join 1</i> para mostrar el modelo sólido	81
Figura 129: Sección de la pieza en CATIA	81
Figura 130: Modelo de una primera iteración en PhotoScan	82
Figura 131: Modelo de una segunda iteración en PhotoScan	82
Figura 132: Pieza 2 obtenida desde PhotoScan	83
Figura 133: Pieza 2 obtenida mediante el láser FARO Quantum	83
Figura 134: Pieza 3 obtenida desde PhotoScan	84
Figura 135: Pieza 3 obtenida mediante el láser FARO Quantum	84
Figura 136: Pieza 3 seccionada obtenida desde PhotoScan	85
Figura 137: Pieza 3 seccionada obtenida mediante el láser FARO Quantum	85





# 1 INTRODUCCIÓN

---

*Si haces un producto superior, la gente lo comprará.*

*- Soichiro Honda -*

El presente capítulo tiene como objetivo hacer un pequeño repaso histórico a la evolución de las tecnologías de recreación 3D de objetos existentes, haciendo especial inciso en presentar la técnica de la fotogrametría, y definir ciertos conceptos técnicos necesarios para poder establecer una base sólida que permita realizar el estudio que se pretende hacer.

## 1.1 El deseo por documentar la realidad

Aunque se acepte que la tecnología 3D es un fenómeno que ha emergido en los últimos 30 años, el afán del ser humano de replicar objetos de la realidad y crear modelos tridimensionales se remonta a miles de años de historia.

Hace unos 30000 años nuestros ancestros se dedicaron a la pintura en cuevas y a la fabricación de esculturas y estatuillas. No se sabe realmente si lo hicieron por razones religiosas, por un afán de documentar su entorno o si solamente lo hicieron con el fin de explorar una nueva tecnología. Durante gran parte de nuestra historia, este era el único método con el que registrar el mundo real, aunque con una fuerte influencia subjetiva.

La invención de la fotografía en la primera mitad del siglo XIX (la primera fotografía, en la Figura 1, fue tomada por Joseph Nicéphore Niépce en 1826), hace casi 200 años, introdujo posibilidades completamente nuevas y objetivas, y abrió la puerta a un nuevo tipo de arte.



Figura 1: Primera fotografía de la historia, tomada por Joseph Nicéphore Niépce en 1826 [1]

## 1.2 La fotogrametría: structure from motion

La fotogrametría se define como la ciencia cuyo objetivo es conocer las posiciones y dimensiones de objetos en el espacio, a través de medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías. Etimológicamente, fotogrametría significa medir sobre fotos.

Con una única foto se obtiene información bidimensional de la geometría y la posición del objeto. Sin embargo, al trabajar con dos fotos, la zona común o “de solape” entre estas permite tener una visión estereoscópica de la composición. Es decir, información tridimensional [2]. Se trata de una técnica básica para la elaboración de toda la cartografía. Existen, principalmente, dos metodologías bien diferenciadas: la fotogrametría aérea y la fotogrametría terrestre.

En la fotogrametría aérea, las fotografías son tomadas desde cámaras montadas en dispositivos voladores para crear modelos bidimensionales o tridimensionales, actualmente son muy usados los drones (ver Figura 2). Se trata de una técnica que ha sido ampliamente utilizada por catógrafos, topógrafos, ingenieros y arquitectos. Para generar estos modelos se necesita que se solapen, como mínimo, dos imágenes tomadas desde diferentes perspectivas de una misma localización para estimar las localizaciones de los puntos pertenecientes a los diferentes objetos que aparecen en las fotografías [3].



Figura 2: Uso de drones en estudios fotogramétricos [4]

Una de las principales ventajas de este método de trabajo se encuentra en la posibilidad de examinar vastas extensiones de superficie, de especial utilidad para el desarrollo urbanístico y rural, para estudios medioambientales o para análisis de terrenos.

Tradicionalmente, la toma de fotografías para llevar a cabo esta técnica se hace mediante cámaras digitales montadas en la parte inferior de un avión, controladas por un operario desde el interior de la aeronave, que va realizando diferentes pasadas sobre la zona de interés. El resultado de estas técnicas se puede observar en la Figura 3. Sin embargo, en los últimos años se ha ido popularizando el uso de drones para esta tarea, abaratando los costes de estos estudios y facilitando su acceso.

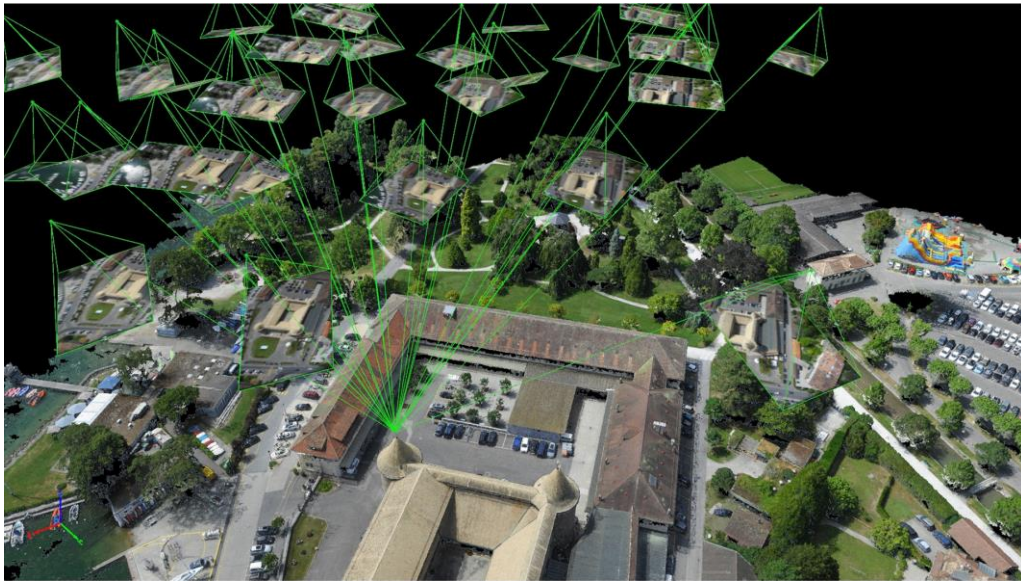


Figura 3: Fotografías que contribuyen a la reconstrucción de un punto en el entorno tridimensional [5]

Por el contrario, en la fotogrametría terrestre se opera con una cámara situada sobre la superficie terrestre, de manera estacionaria, ya sea sostenida de forma manual, sobre un trípode, o montada o suspendida de cualquier otro tipo de dispositivo (ver Figura 4). Se trata de una metodología que requiere un menor nivel técnico que la fotogrametría aérea, además de una menor inversión económica. Típicamente puede resultar útil al trabajar con edificios o construcciones civiles como puentes, o con problemas relacionados con movimientos de tierras de menor escala que las que se tratan en la fotogrametría aérea. No obstante, es habitual que la fotografía terrestre se utilice en ciertos trabajos para complementar los resultados de la fotogrametría aérea [6].



Figura 4: Trípode motorizado de 10m de altura para estudio fotogramétrico [7]

Las técnicas fotogramétricas se pueden encontrar en diferentes campos:

- Agronomía.

- Cartografía.
- Ortofotografía.
- Arquitectura.
- Planeamiento y ordenación del territorio.
- Medio ambiente.
- Arqueología.
- Control de estructuras.
- Mediciones.
- Topografía.
- Medicina.
- Zoología [8]

Dentro de la fotogrametría se encuentra la técnica Structure from motion (SfM). El ser humano es capaz de obtener información tridimensional de su entorno a partir del movimiento de este usando las imágenes bidimensionales percibidas a lo largo del tiempo. Esto es lo que busca el SfM. SfM es una técnica de obtención de datos tridimensionales de alta resolución a partir únicamente de unas cuantas fotografías tomadas desde diferentes puntos de vista, como se representa en la Figura 5. Esta técnica, a diferencia de otros métodos de captación tridimensional, no requiere conocer a priori la escala, posición y orientación de las cámaras respecto del modelo a tratar, sino que utiliza un proceso completamente automático.

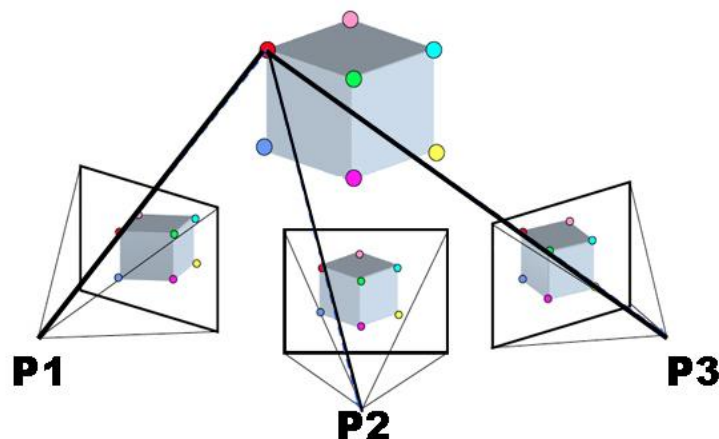


Figura 5: SfM, identificación de puntos homólogos entre diversas fotografías [2]

Para ello, en una primera fase se realiza una identificación de características comunes en las diferentes imágenes que permita relacionarlas. Un popular acercamiento a este problema es el sistema de extracción de características SIFT, que busca particularidades de cada imagen que sean invariantes en la escala, la rotación y los cambios de condiciones lumínicas, para que así sean fácilmente identificables en cada imagen. Estas características invariantes reciben el nombre de “puntos clave”, que dependen de la textura (las texturas homogéneas presentan dificultades a la hora de señalar puntos clave) y de la resolución (a mayores resoluciones, mayor cantidad de información sobre el modelo disponible).

Teniendo esta base de datos de puntos clave, se reconstruyen los puntos en el espacio tridimensional formando lo que se conoce como “nube de puntos”. Para llevar a cabo esta reconstrucción, se toman puntos clave coincidentes en varias fotografías y se añaden los puntos vecinos a dicha zona que compartan características similares en diferentes imágenes. Así, también se realiza un filtrado de los puntos, pues se elimina información no deseada que pueda aparecer en las imágenes como desenfoques o elementos en movimiento [9] [2].



### 1.3 El escaneado 3D: evolución histórica

Todo empezó con el antiguo pueblo de Egipto, hace unos 5000 años, donde ya se creaban réplicas de yeso en 3D de cabezas de momias haciendo uso de técnicas de triangulación. Este proceso requería materiales como lino y yeso, los cuales eran muy preciados en la época, y de largos procesos que consumían mucho tiempo, por lo que, aunque existía la tecnología, no era de uso común. Si se remonta a unos 2500 años atrás, Euclides y Arquímedes ya había establecido los fundamentos matemáticos de la trigonometría y, en el siglo XVII, Snell von Rojen había estudiado las leyes de la triangulación óptica. Sin embargo, los escáneres 3D de uso práctico, basados en técnicas de triangulación y capaces de captar una imagen tridimensional con suficiente resolución, sólo se llevan utilizando desde hace 25 años, después de una década de acercamientos teóricos, montajes y pruebas en laboratorios y prototipos basados en los últimos desarrollos de sistemas de procesamiento de imagen.

Se puede asumir que la mayoría de los pioneros en sus primeros años, ya sea explorando el campo de las técnicas láser como David Addleman en Estados Unidos o optando por el camino de la topometría como Bernd Breuckmann en Alemania, no podían predecir completamente el potencial de esta nueva tecnología, cuando estos empezaron sus desarrollos con videocámaras analógicas, equipadas con tubos de rayos catódicos en vez de sensores CCD o CMOS, ordenadores con una CPU con 512 KB máximos, dispositivos de almacenamiento con capacidad para 5 MB y capturadoras de fotogramas para convertir la señal óptica en una señal digital con una resolución típica de 512 x 512 píxeles. En particular, la calibración del escáner, con una precisión y estabilidad suficientes para aplicaciones de metrología resultó ser un problema desafiante. Por lo tanto, los primeros sistemas de escaneado 3D, instalados para aplicaciones industriales, fueron diseñados manualmente para inspección de superficies, mediciones de comparación y análisis de deformación [1].

Los primeros escáneres digitales 3D en los años 80 usaban sondas de contacto, también llamados palpadores: sensores táctiles que tocaban físicamente al objeto a escanear miles de veces hasta que se tenían suficientes puntos como para poder crear una imagen digital o modelo 3D. Estos tipos de escáneres necesitaban casi tanto tiempo como las técnicas egipcias, por lo que no resultaban ser rentables.

A finales de los 80, con la llegada de la tecnología óptica y las innovaciones que acabaron con este tipo de técnicas tan demandantes, se inicia la chispa de la revolución en el escaneado 3D. Aparecen los primeros sistemas de escaneo 3D, basados en la triangulación de imagen, que fueron instalados con aplicaciones industriales, principalmente inspección superficial, mediciones comparativas o análisis de deformaciones. Hizo falta otra década más para introducir el escaneo 3D en trabajos relacionados con el patrimonio cultural. Lo único que se oponía a su llegada era otro problema: el almacenamiento. El almacenamiento ha sido la perdición de las ideas de los visionarios digitales desde el amanecer de la tecnología. Existía la capacidad para digitalizar objetos del mundo real, pero no la forma de manejar el enorme volumen de datos que esta tecnología precisaba.

Con la gran evolución de los medios de almacenamiento de datos, los 90 vieron un gran impulso de las capacidades del escaneado 3D con los primeros escáneres 3D que llegaron al mercado. Además, por esta fecha la tecnología había alcanzado un grado de madurez que permitía escanear objetos frágiles y digitalizar colores. Hoy en día, el escaneado 3D de alta definición es usado en arqueología y paleontología, para un amplio rango de figuras, estatuas y pequeños edificios [10].

La aparición de estos escáneres en el mercado propició la competición de diferentes compañías que facilitaron la llegada de dispositivos más fiables, avanzados y económicos, llegando hasta nuestros días. Esto significa, por tanto, que nos encontramos en un nivel de madurez aún en desarrollo, donde hay cabida a la experimentación y a la apertura de nuevos horizontes para los procesos de escaneado, para lo cual es de gran ayuda internet y la enorme comunidad online que ha traído consigo, y que hace que esta tecnología avance a pasos agigantados. [10] [1].

### 1.4 Escaneado láser

La técnica del escaneado láser 3D (también conocida como LiDAR) es un método de captura de información tridimensional no intrusivo, que se basa en la emisión de un rayo láser que va barriendo, de distintas formas, el

modelo. El escaneado láser combina el direccionado controlado de haces láser con un telémetro láser<sup>1</sup>. Al recoger las distancias de puntos en varias direcciones, el escáner es capaz de capturar las distintas superficies del objeto del escaneo.



Figura 6: Escáner láser de escritorio Smart3D [11]

Estos datos son recogidos en bases de datos que conforman nubes de puntos en un espacio tridimensional, que pueden ser fácilmente manipuladas y visualizadas a través de diferentes softwares en un ordenador. En las siguientes Figuras 7 y 8



Figura 7: Asiento del coche ARUS y nube de puntos de escáner láser de mano



---

<sup>1</sup> Un telémetro láser utiliza un rayo láser para determinar la distancia hasta un objeto. El tipo más común se basa en medir el tiempo que toma un pulso láser emitido en rebotar del objetivo y volver al emisor. Debido a la alta velocidad de la luz, no es una técnica apropiada para mediciones submilimétricas de alta precisión, donde se sueñen utilizar la triangulación y otras técnicas.

Figura 8: Motor J85-GE-13 y nube de puntos de escáner láser de mano

En la actualidad se puede encontrar una gran variedad de escáners láser, con diferentes velocidades, precisiones, alcances y ámbitos de uso.

Existen varios beneficios del modelado CAD 3D en una fase de diseño en ingeniería. Aquí se presentan 9 razones para optar por el modelado CAD 3D en esta fase:

- Mejora en la calidad del diseño: el software de modelado 3D incorpora más de 700.000 modelos estándar basados en componentes mecánicos. Usar este tipo de software para el diseño de un proyecto ingenieril facilitar la labor de diseño en sí, asegurando la precisión del diseño y ahorrando tiempos.
- Aumento de productividad del diseñador: el modelado CAD 3D ayuda al diseñador a visualizar los componentes mecánicos en el espacio tridimensional ya en la fase inicial, permitiéndole hacer cualquier cambio necesario de forma instantánea y evitando un proceso posterior de rediseño.
- Facilidad para la documentación: los métodos tradicionales de dibujo requerían identificar varios aspectos del componente mecánico, lo cual es un proceso repetitivo que requiere exactitud. El modelado CAD facilita este proceso de documentación, al presentar varias opciones de documentación automáticas y flexibles, como dimensiones, materiales, especificaciones ...
- Compatibilidad con estándares internacionales: el diseño CAD 3D asegura la compatibilidad con los estándares internacionales. Este soporta plataformas normalizadas a ISO, DIN o ANSI, entre otras. Esta fidelidad para con los estándares internacionales mejora la comunicación interna y promueve la obtención de mejores resultados.
- Reducción en el tiempo de diseño: un modelo virtual acelera el proceso de diseño, alcanzando el proceso de producción de los componentes mucho antes.
- Visualización más atractiva para los clientes: el modelado CAD 3D proporciona una visualización del componente en un entorno tridimensional que permite animaciones. Eso se traduce en una mejor demostración de la función y de las propiedades del componente.
- Archivado de diseños: algunos componentes estándar no requieren volver a ser comprobados, por lo que se ahorra tiempo en la creación de futuros diseños.
- Ahorro de costes: todos estos ahorros de tiempo se pueden traducir en un ahorro de dinero.

El diseño CAD 3D ha permitido modernizar y mejorar el ampliamente usado diseño CAD 2D, permitiendo alcanzar mejores soluciones a los problemas ingenieriles de forma más eficiente.

## 1.5 Objetivo

Este Trabajo de Fin de Grado busca validar el levantamiento 3D de piezas pequeñas mecánicas en contraste con las técnicas de escaneado como el escáner láser de estación fija, el escáner láser manual o el escáner láser con brazo. Además, quiere servir como guía de inicio rápido para cualquier persona que se enfrente por primera vez a un software de fotogrametría. Se ha optado por utilizar para esto el software PhotoScan que desarrolla Agisoft, pues es una herramienta de fácil uso y, por el hecho de que las opciones gratuitas de software libre presentan problemas de compatibilidad hoy en día.



## 2 DATOS DE PARTIDA

En el presente apartado se pretende exponer todos aquellos datos, medios, software y dispositivos utilizados a la hora de llevar a cabo el estudio de las diferentes técnicas de levantamiento 3D. Hay que indicar que se trata de material de aficionado y no de material profesional, por lo que siempre se podría optar por otros medios más indicados para la tarea como una lente polarizada o iluminación artificial debidamente filtrada para evitar reflejos. [12].

### 2.1 Modelos

En cuanto a los modelos a utilizar se cuenta con varias piezas mecánicas proporcionadas por el departamento de Ingeniería Gráfica de la ETSI de Sevilla, que se utilizan tanto en el proceso fotogramétrico como en las técnicas de escaneado láser. Estas piezas aparecen en las siguientes Figuras 9, 10 y 11, y sus características principales pueden consultarse en la Tabla 1.

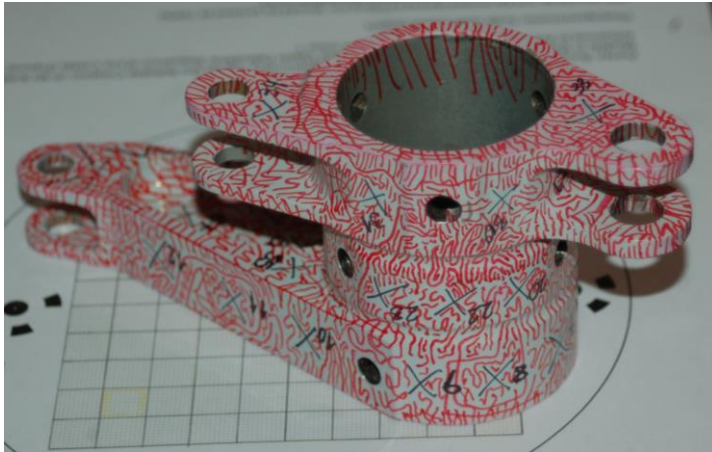


Figura 9: Pieza 1



Figura 10: Pieza 2

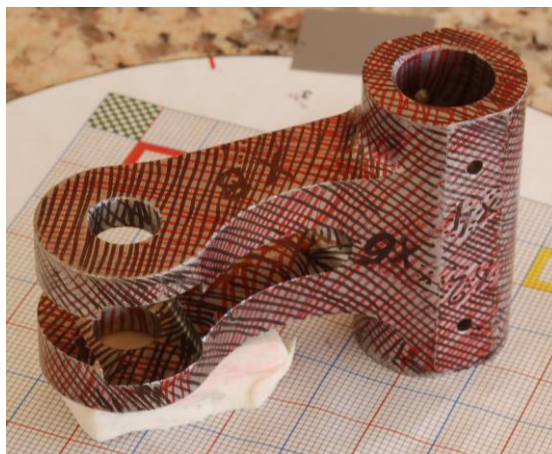


Figura 11: Pieza 3

	Material	Densidad	Peso	Acabado
<b>Pieza 1</b>	Aluminio	$\sim 2710 \text{ kg/m}^3$	237g	Pintura brillante
<b>Pieza 2</b>	Aluminio	$\sim 2710 \text{ kg/m}^3$	66g	Pintura brillante
<b>Pieza 3</b>	Acero	$\sim 7860 \text{ kg/m}^3$	213g	Pulido

Tabla 1. Características principales de las piezas a estudiar

## 2.2 Instrumentación

Dentro de este apartado se describe la instrumentación usada, incluyendo el hardware disponible.

### 2.2.1 Hardware

Como estación de procesamiento de los datos (como las imágenes o las nubes de puntos) se ha utilizado el ordenador personal del alumno, el cual presenta el siguiente hardware:

- Procesador: i7 4770k
- RAM: 16GB DDR3 a 1800Mhz
- Tarjeta gráfica: GTX780
- Disco duro con velocidades de lectura y escritura de 100MB/s
- Sistema operativo: Windows 10 de 64 bits

Para la adquisición de las fotografías necesarias en las técnicas de fotogrametría se utiliza también la cámara personal del alumno:

- Nikon D50.
- Objetivo Nikon AF Nikkor 28-100 mm f/3.5-5.6 G AF.
- Trípode telescópico.

### 2.2.2 Software

En el mundo del modelado tridimensional se trabaja con una gran cantidad de formatos de archivos y diferentes softwares, por lo que moverse de uno a otro requiere conocerlos y saber pasar de unos a otros. A continuación, se presenta el software utilizado en particular en el desarrollo de este trabajo

- AUTOCAD 2018: Dado a su capacidad para tratar con una gran cantidad de formatos diferentes, se utiliza AutoCAD 2018 para importar y visualizar los datos obtenidos mediante el escaneo láser.
- CloudCompare: El software CloudCompare también resulta de especial utilidad, al tener una gran capacidad para trabajar con nubes de puntos.
- Agisoft Photoscan: Y, por supuesto, también se utilizará el software Agisoft PhotoScan, en su versión 1.0.4, para llevar a cabo todas las operaciones necesarias a la hora de digitalizar un modelo completo mediante la técnica de la fotogrametría. Éste se presenta como un software independiente, que realiza procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos tridimensionales a partir de éstas, pensado para aplicaciones de SIG (sistema de información informática), conservación del patrimonio cultural y producción de efectos especiales además de para medición indirecta sobre objetos de diferentes escalas [13]. Se ha decidido utilizar este software debido a que implementa técnicas de fotogrametría de gran potencia en una interfaz de usuario limpia, sencilla e intuitiva, e integrada con



métodos de visionado computacional. Así, el software puede ser utilizado tanto por, como en este caso, un nuevo usuario en el campo de la fotogrametría, como por un especialista en la materia, que puede ajustar el flujo de trabajo según el resultado buscado y el modelo que se desea digitalizar. En el mercado se pueden encontrar otros softwares similares como rayCloud de la empresa Pix4D o ReCap Photo de Autodesk.

### 2.2.3 Escáneres láser

Para la digitalización de los modelos utilizando la técnica de escaneado láser se utilizan diferentes escáneres industriales de diferentes fabricantes. Estos son:

- **FARO Quantum<sup>S</sup>**

La empresa de metrología FARO cuenta en su catálogo con el escáner láser con brazo articulado Quantum<sup>S</sup>. Este dispositivo presenta un potente escáner láser que se integra en el brazo de medición también patentado por la compañía: el FaroArm, una máquina portátil de medición por coordenadas. Este cuenta con encoders rotatorios en cada una de sus articulaciones que aseguran el nivel de precisión que promete, además de integrar un proceso de autocalibración en su software que tiene en cuenta no sólo las posiciones de referencia iniciales sino también la temperatura ambiental.



Figura 12: FARO Quantum<sup>S</sup> con trípode y sonda manual en el extremo del brazo

Su software también presenta características especialmente interesantes para el objeto de este documento, como la construcción en tiempo real del mallado del modelo, sin necesidad de trabajar con la red de puntos intermedia que genera el escaneado. La densidad del mallado que se consigue es muy abundante y precisa, por lo que el dispositivo incorpora un almacenamiento interno en el que sólo se puede conseguir transferir dicha cantidad de datos mediante cableado (a través del brazo). Aun así, el resultado del proceso se puede verificar en la pantalla de un ordenador conectado mediante wifi. Según la información de su página web: “Permite verificar fácilmente la calidad de los productos llevando a cabo inspecciones 3D, certificaciones de herramientas, comparaciones CAD, análisis dimensionales, ingeniería inversa y más” [14].

### – Leica ScanStation P16

El departamento de Ingeniería Gráfica de la ETSIA de Sevilla ha permitido usar sus instalaciones y medios para llevar a cabo el escaneado láser usando el escáner láser fijo Leica ScanStation P16. Se trata de un escáner de barrido láser de hasta 40 metros de alcance, con una toma de datos de hasta 1.000.000 de puntos por segundo, pensado para estudios topográficos en exteriores, por lo que también resiste a temperaturas de funcionamiento de entre -20°C y 50°C [15].



Figura 13: Escáner láser LEICA ScanStation P16

No obstante, este tipo de escaneo está enfocado al estudio topográfico y al registro de grandes volúmenes como edificios, por lo que el escaneado de detalle de pequeñas piezas, como es el tema principal de este documento, no promete buenos resultados. Aun así, se documenta esta técnica al presentarse la posibilidad de probarla.

### – GeoSLAM ZEB-REVO RT

El dispositivo de escaneo que se ha usado en este documento es el ZEB-REVO RT de GeoSLAM. Se trata de un láser de pequeño tamaño, ligero y manejable, que apenas requiere de experiencia previa para su uso. Este proyecta un haz láser de precisión centimétrica que se monta en una sonda giratoria y que se sostiene con la mano. La toma es de más de 40.000 puntos por segundo.



Figura 14: Láser de mano el ZEB-REVO RT [16] [17]



## 3 METODOLOGÍA GENERAL

*De vez en cuando vale la pena salirse del camino, sumergirse en un bosque. Encontrarás cosas que nunca habías visto.*

*- Alexander Graham Bell -*

**D**urante el desarrollo del estudio de las diferentes técnicas de medición y escaneado que se plantean para el presente documento, se han tratado con varias técnicas de escaneado láser muy diferentes, además del propio SfM, del que se entra a explicar más a fondo dentro del entorno de PhotoScan. En este apartado se pretende dar una pequeña pincelada sobre cada uno de estos métodos, presentando generalidades sobre ellos como la configuración que requieren o la forma en que se trabaja con los datos que generan, ya sean en forma de nubes de puntos o cualquier tipo de archivo de dibujo.

### 3.1 Structure from motion

#### 3.1.1 Preparación de piezas y toma de fotografías

Como se ha comentado en el apartado de introducción, SfM utiliza fotografías para extraer información tridimensional. Es por esto que la toma de fotografías es un punto fundamental en el aseguramiento de buenos resultados con esta técnica. En el transcurso de este trabajo se han desarrollado ciertas nociones sobre la captura de imágenes que se exponen a continuación.

La práctica nos dice que es necesaria una superposición nominal de entre un 50 y un 70% de puntos clave entre fotografía y fotografía para que el software pueda calcular sin problemas la geometría y reconozca las imágenes como adyacentes. En este caso, las fotos se han hecho cada 15° aproximadamente, o lo que es lo mismo, la vuelta completa a la pieza se completa con unas 24 fotos. Se han añadido algunas fotos adicionales para ciertas perspectivas donde, con el objetivo óptico mencionado con el que se han realizado y la configuración de la cámara, no se consigue una correcta nitidez en la totalidad de la pieza. Para estos casos, se hace una foto intentando conseguir nitidez en una mitad de la pieza, generalmente la parte más cercana (ver Figura 15) o la más alejada de la cámara (ver Figura 16), y, acto seguido, se realiza otra fotografía en la parte de la pieza donde no se ha conseguido dicha nitidez.

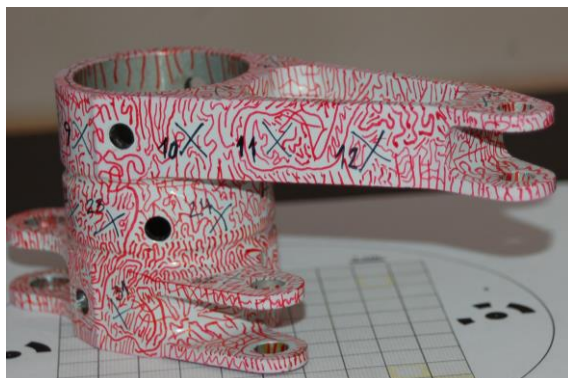


Figura 15: Búsqueda de nitidez en la parte más cercana a la cámara

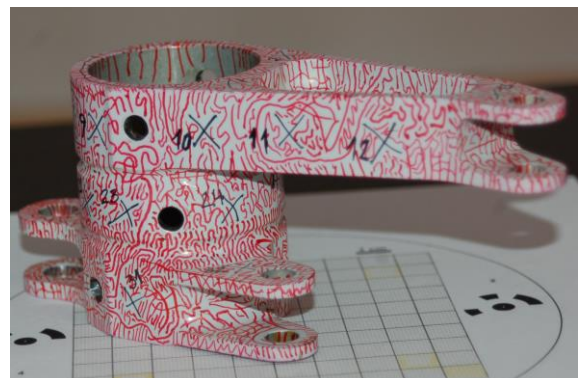


Figura 16: Búsqueda de nitidez en la parte más alejada de la cámara

La falta de nitidez puede suponer un problema para el algoritmo de cálculo que posee el software, al no tener capacidad para reconocer patrones en el modelo. Es por esto que es altamente recomendable tener los recursos necesarios para conseguir dicha nitidez en toda la imagen si se quiere llevar a cabo este proceso de forma rápida y fiable, o si se trata de una tarea donde se requieran escanear una gran cantidad de modelos. Entre estos medios se pueden incluir cámaras, objetivos, trípodes y medios de sujeción o medios de iluminación. Incluso se pueden encontrar configuraciones de escaneado 3D como la de la Figura 17, para escaneados de cuerpo completo, con varias cámaras ya colocadas y configuradas y con los elementos de iluminación oportunos para realizar el trabajo rápidamente y de una forma semiautomática.



Figura 17: Estación de fotogrametría profesional para escaneos de cuerpo completo [18]

Por comodidad, también se puede contar con la ayuda de una mesa giratoria para la toma de fotografías de objetos pequeños. Con esto, se coloca la cámara con el trípode orientado hacia el modelo, que se coloca en el centro de rotación de la mesa, y se realizan las fotografías alternando con un giro leve de la mesa, consiguiendo así resultados más homogéneos en menos tiempo y de forma más cómoda. Las alineaciones conseguidas con y sin mesa rotatoria se pueden contrastar en la Figura 18 y Figura 19, respectivamente.

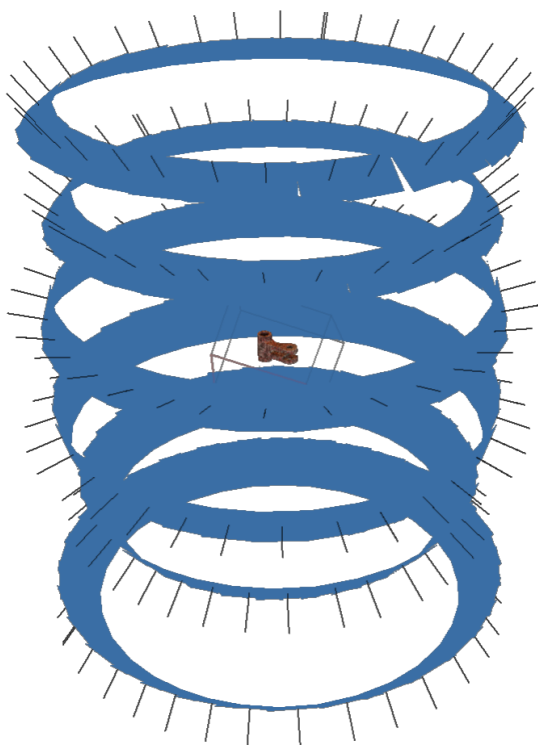


Figura 18: Posiciones de las cámaras usando una mesa rotatoria

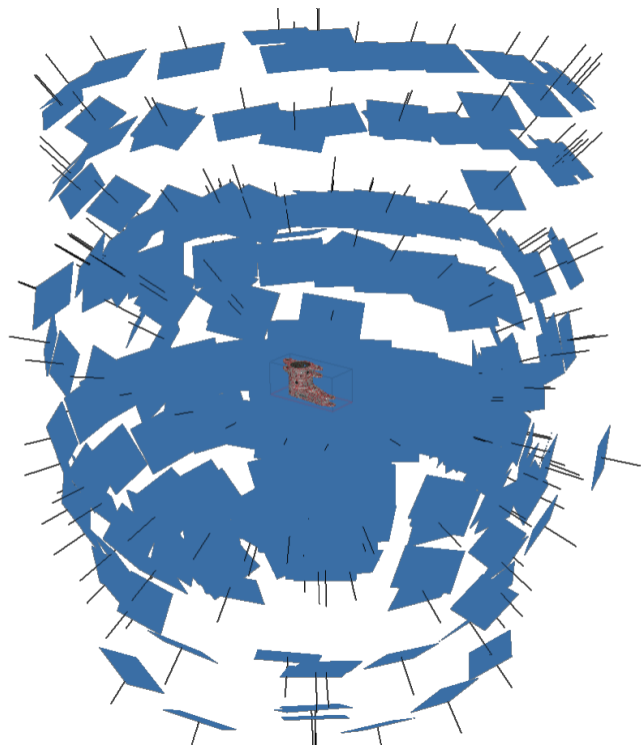


Figura 19: Posiciones de las cámaras sin el uso de mesa giratoria

### 3.1.2 Flujo de trabajo

Para el caso de la fotogrametría, se usa el flujo de trabajo o *Workflow* típico de esta técnica. Esto es especialmente intuitivo en el caso de Agisoft PhotoScan, ya que presenta la pestaña superior *Workflow*, donde aparecen, en orden, los procesos a seguir para conseguir un conjunto geométrico tridimensional completo, llegando hasta su texturización [19] [20].

- **En primer lugar, se fotografian los objetos.** Se requiere de una planificación y configuración previa, tras la cual se procede a la obtención de las imágenes y, si es necesario, a su posterior procesado.
- **Orientación y alineación de las fotografías.** Se colocan los fotogramas en la misma posición que ocupaban entre ellos en el momento de las tomas (orientación y posición relativa). También se sitúan sus marcas de referencia, si las tuviese.
- **Formación de la nube de puntos por rectificación.** Consiste en, teniendo orientadas y localizadas las fotografías en el espacio tridimensional, hallar la intersección de haces entre características comunes para construir la nube de puntos que conformará el modelo.
- **Creación del mallado a partir de la nube de puntos.** En este punto se calculan los polígonos para adaptarse a la nube de puntos final obtenida. Así, se crean superficies basadas en triángulos que configurarán el modelo final.
- **Generación y mapeado de textura.** Se registra el acabado de las superficies en la geometría final del modelo a partir de la superposición de las fotografías.

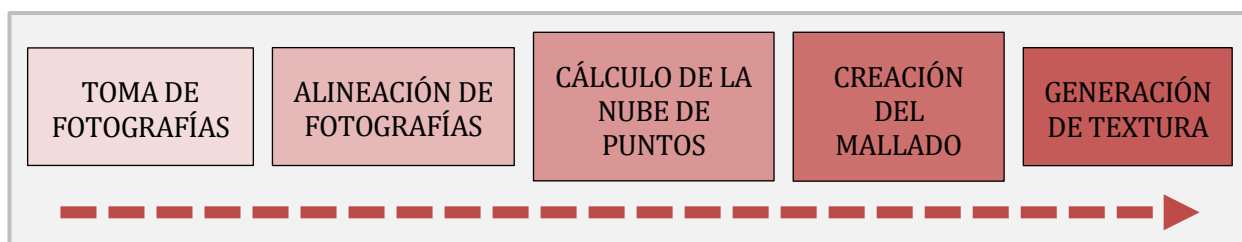


Figura 20: Flujo de trabajo típico de SfM

## 3.2 Medición y escaneado láser

### 3.2.1 Brazo articulado: FARO Quantum<sup>S</sup>

Su utilización es simple e intuitiva. En primer lugar, es necesario realizar el calibrado de la máquina. Esto se realiza siguiendo los pasos que nos marca el software al que se conecta en el ordenador y utilizando las plantillas propias del fabricante, como se muestra en la Figura 21.

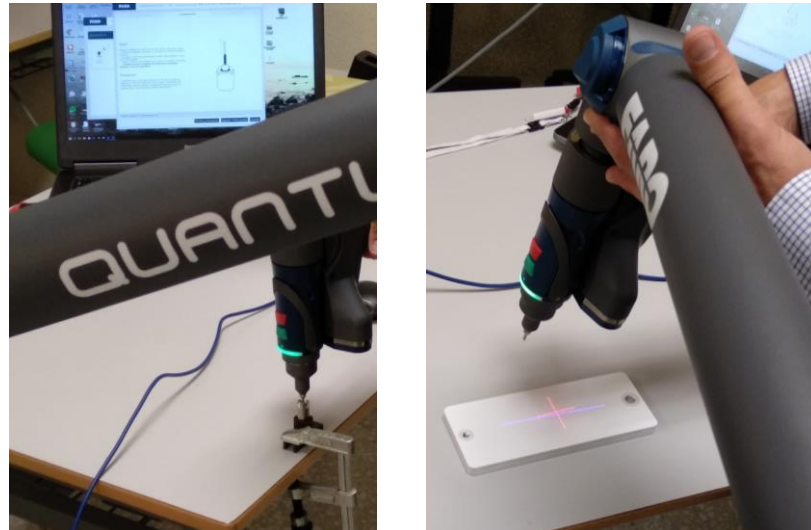


Figura 21: Calibrado del escáner láser con brazo articulado

Con este calibrado se le da un origen al sistema de referencia, un punto fijo (Figura 21: izquierda), y una superficie horizontal plana (Figura 21: derecha) para ajustar la lectura del láser y la inclinación de la sonda.

Una vez calibrado, se inicia el software desde el ordenador y se comienza el escaneo tras establecer la conexión con el dispositivo. El proceso es simple: se va “pintando” la pieza, pues no se escanea punto a punto, sino que la sonda proyecta un haz láser que va barriendo e identificando puntos sobre la superficie que barre.

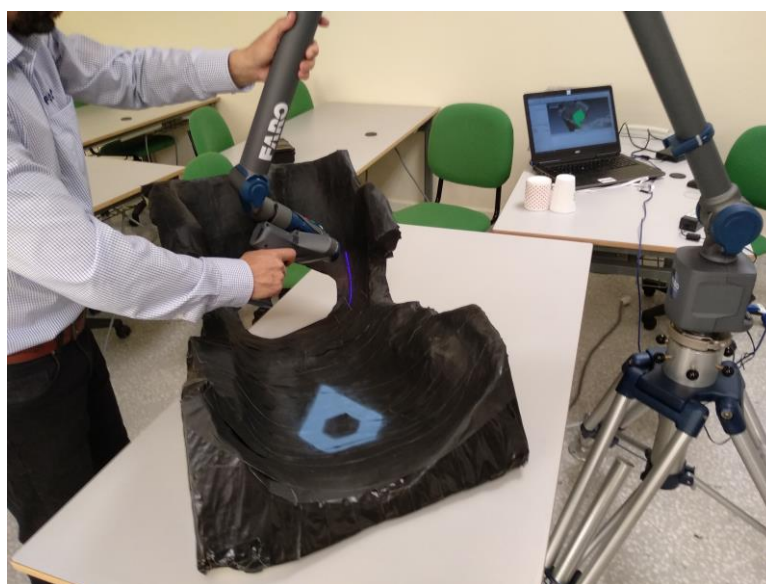


Figura 22: Proceso de escaneo superficial usando el láser FARO

Dependiendo de la configuración y las particularidades del modelo en cuestión, puede que se requieran varias sesiones de escaneo utilizando diferentes disposiciones del objeto en cuestión. Así, en el caso de la silla, por



ejemplo, mostrado en la Figura 22, si sólo se utiliza la información que puede proporcionar la configuración mostrada se va a perder parte de la geometría, en concreto la que queda contra la mesa sobre la que se apoya la silla. Para lidiar con esto es necesario realizar otro escaneo utilizando una disposición que permita captar estas características y realizar el escaneo. Posteriormente, se pueden unir ambos conjuntos geométricos para obtener el modelo completo.

### 3.2.2 Medición láser desde estación fija: Leica ScanStation P16

Este tipo de escaneo está enfocado al estudio topográfico y al registro de grandes volúmenes como edificios, por lo que el escaneado de detalle de pequeñas piezas, como es el tema principal de este documento, no promete buenos resultados. Aun así, se documenta esta técnica al presentarse la posibilidad de probarla.

Esta técnica permite recoger nubes de puntos de varios modelos en una misma sesión de escaneado, por lo que, para aligerar el proceso y conseguir una sólo nube de puntos que contenga todos los modelos, se disponen todos sobre una mesa en el centro de la sala.

Para obtener un modelo con dimensiones reales, se requiere referenciar algunos puntos del entorno donde se va a llevar a cabo el escaneo para darle escala a las nubes obtenidas. De estos puntos se precisa conocer su posición en el espacio y sus medidas reales. En el caso que se presenta, se utilizan unas dianas o *targets*, en concreto cuatro, que se colocan en el escenario y que se localizan utilizando una estación total láser (Figura 23). Esta estación sólo localiza estos puntos, la adquisición de la nube de puntos se realiza mediante el escáner láser.



Figura 23: Medición y localización de los *targets* usando la estación total

Estos *targets*, también de la empresa Leica, son discos de color negro y blanco. La estación láser desde la que se realiza el escaneo tiene la capacidad de detectar la reflectividad de los materiales escaneados, por lo que, en las nubes de puntos generadas más adelante pueden ser identificados fácilmente. [21]



Figura 24: Dianas (*targets*) utilizados

Una vez que se ha verificado la situación de estos puntos, se puede pasar a realizar el escaneado del conjunto de modelos, dispuestos en el centro de la sala. Este funciona según una mecánica de barridos, que va realizando pasadas en un amplio abanico y recoge información sobre la distancia que viajan los haces de láser que proyecta. Así, se genera una gran nube de puntos, con toda la información sobre la sala en que se realiza la documentación. Se necesitan de varios escaneos desde distintas posiciones para cubrir completamente las superficies de las piezas. Es por esto que, en el caso que se presenta, al pretender escanear varios objetos, estos se disponen todos en la sala sobre una mesa, intentando que no se hagan “sombra” unos a otros desde las diferentes posiciones de escaneado. Tampoco se debe reconfigurar la disposición entre escaneado y escaneado, pues esto generaría errores al superponer las nubes de puntos.



Figura 25: Previsualización del escaneado desde escáner láser fijo

Una vez completadas las diferentes tomas de las nubes de puntos, estas se han de trabajar para conseguir obtener la nube de cada uno de los modelos que se buscan. Es necesario, en primer lugar, combinar las diferentes nubes en una sola. Esto se puede realizar con diferentes softwares. En este caso se ha optado por CloudCompare, un software gratuito centrado en la manipulación de nubes de puntos, con el que también se han extraído las nubes de cada modelo.

### 3.2.3 Láser de mano: GeoSLAM ZEB-REVO RT

El escaneado con láser de mano portátil tiene como objetivo documentar grandes volúmenes como edificios o terrenos, teniendo como ventaja la posibilidad de desplazar el dispositivo de escaneo alrededor de la zona que se pretende escanear, sin tener que realizar varias tomas y, posteriormente, procesar y alinear varias nubes de puntos, si no que se cuenta con la ventaja de poder llevar a cabo la toma de datos de forma ininterrumpida.

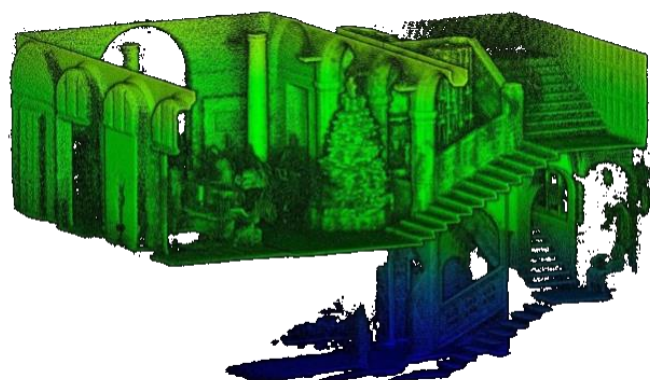


Figura 26: Nube de puntos típica de un láser de mano, del interior de un edificio

En este caso, el escáner se ha de conectar a un sistema de almacenamiento del propio fabricante que se ha de transportar mientras se realiza la toma de datos. Tras el escaneo, se vuelca la información a un USB desde el propio sistema de almacenamiento y, en un ordenador, se pueden observar los resultados de la nube de puntos desde los softwares PointCab o CloudCompare [22] [23].

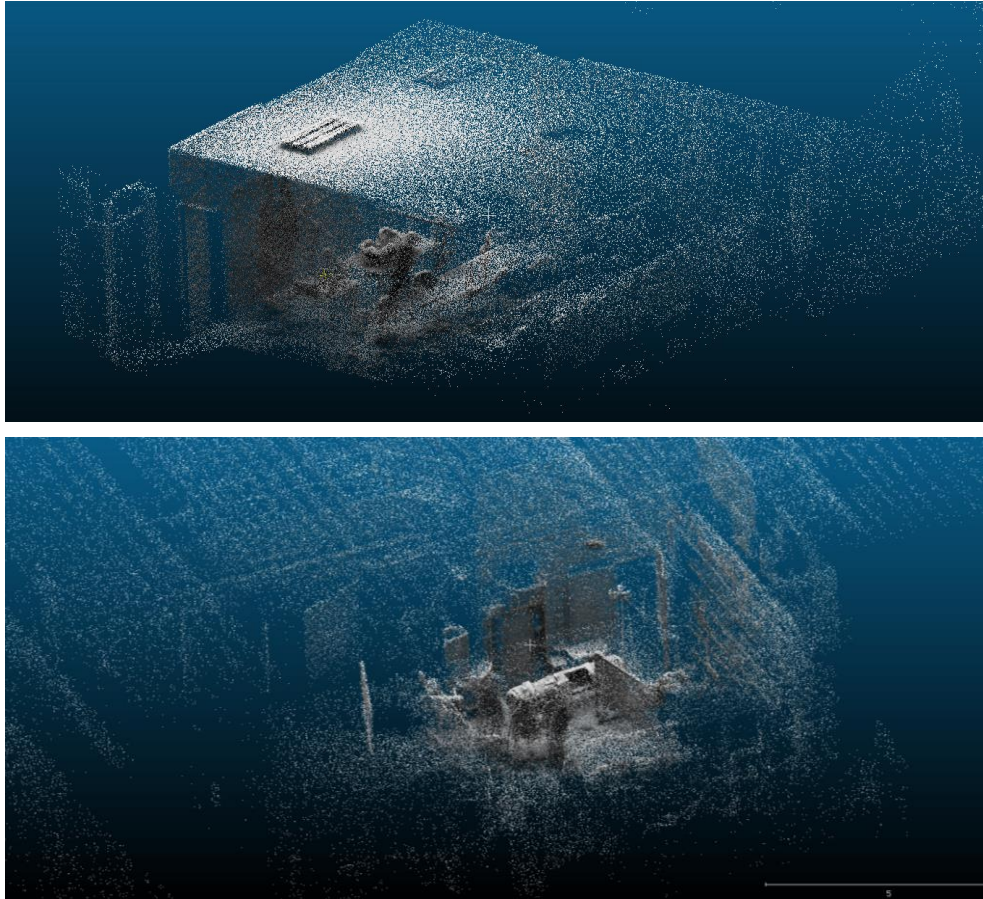


Figura 27: Nube de puntos obtenida en el escaneo del sillón ARUS (arriba) y del motor J85-GE-13 (abajo)

También se realizó el escaneado del mismo sillón del coche del apartado anterior y del turborreactor J85-GE-13 utilizando el escáner portátil de mano. Como se puede apreciar en la Figura 27, se el dispositivo captura detalles de toda la habitación del departamento donde se realiza el escaneado, pues el haz se proyecta en un amplio abanico. Es por esto que las nubes de puntos requieren un postprocesado de limpieza y aislamiento de los modelos en los que se tiene interés.

En cuanto a las nubes de puntos obtenidas del sillón y del motor usando el escáner láser de mano, estas intuyen el volumen de los cuerpos escaneados. Sin embargo, se trata de nubes de puntos no válidas para la creación de un modelo de calidad de los objetos en cuestión por su falta de densidad y por la gran cantidad de incertidumbre en los puntos y de puntos escoria.





## 4 LEVANTAMIENTO 3D MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA DE UNA PIEZA MECÁNICA

*Si le hubiera preguntado a la gente qué querían,  
habrían dicho caballos más rápidos.*

*- Henry Ford -*

Una vez puesto en contexto el software empleado se ponen a prueba sus capacidades mediante un caso de aplicación práctica que puede darse en el ámbito profesional. En este caso, se han escogido varias piezas mecánicas utilizadas por el departamento de ingeniería gráfica en sus clases, por resultar de interés académico en cuanto a formación volumétrica y espacial. Es por esto que se trata de volúmenes interesantes para su escaneado mediante fotogrametría, pues, pese a ser piezas sencillas, permiten poder explorar algunas de las limitaciones de esta tecnología y de este software en concreto. En el presente capítulo se hace un recorrido completo a través del proceso de digitalización de la pieza 1 en PhotoScan, añadiendo algunos comentarios sobre las particularidades encontradas en las otras piezas y acerca de las demás opciones que ofrece este software.

### 3.1. Creación de chunks y adición de fotografías

Una de las particularidades de la técnica de la fotogrametría es el uso de *chunks* para crear los modelos. Los *chunks* permiten separar la geometría de la pieza escaneada en diferentes instancias o grupos geométricos, lo que resulta interesante a la hora de digitalizar una pieza que no es posible escanear con una sola configuración de cámara y/o orientación de la pieza. Estos chunks engloban la información completa de cada una de estas configuraciones: las fotografías y las posiciones de las cámaras, las nubes de puntos y los mallados que se hayan creado.

#### 4.1.1 Creación de chunks

En este caso, se ha optado por utilizar dos *chunks*, dado que es lo mínimo que se considera necesario para obtener un modelo completo de la pieza: uno que observa la pieza en planta si se coloca apoyada sobre una de sus superficies planas, y la vista directamente opuesta, teniendo una visión total así del modelo.

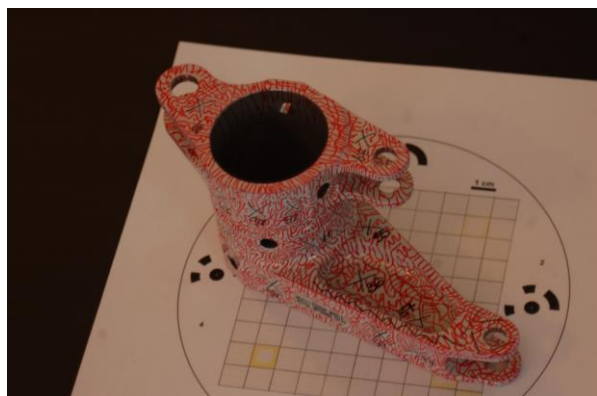


Figura 28: Configuración para el chunk 1

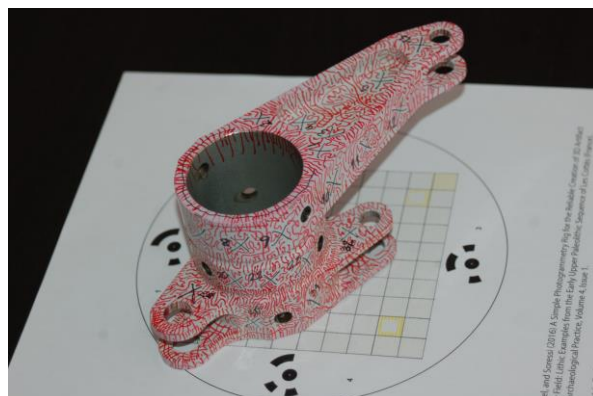


Figura 29: Configuración para el chunk 2

Lo primero para abordar esta pieza es crear dichos *chunks* y añadir sus respectivas fotografías.

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas se procede a añadir las fotografías a nuestro proyecto en PhotoScan. En primer lugar, se crean los *chunks* en el área de trabajo o *Workspace* (Figura 30)

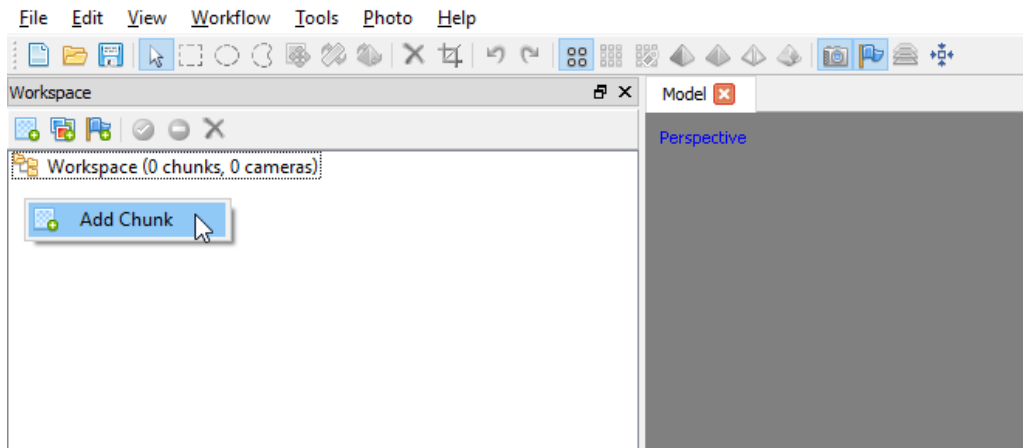


Figura 30: Proceso de adición de *chunks*

Con los *chunks* ya creados estos se pueden renombrar haciendo click derecho sobre ellos y eligiendo la opción de cambiar nombre (*Rename*):

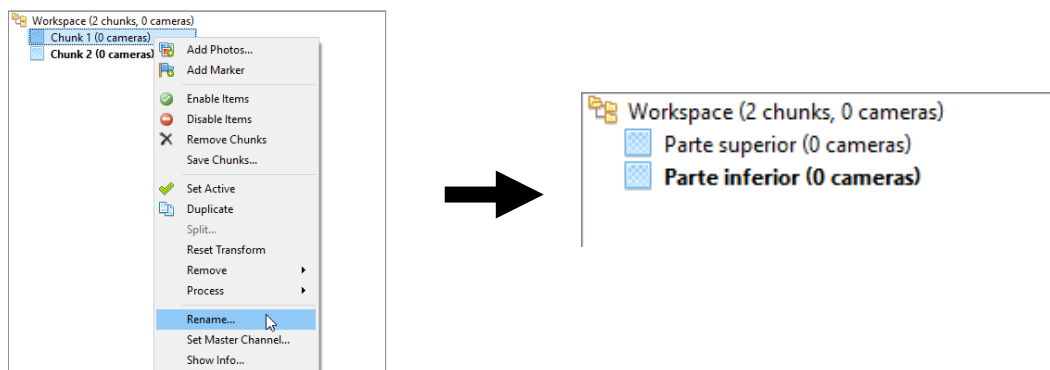


Figura 31: Proceso de renombramiento de *chunks*

#### 4.1.2 Adición de fotografías

Teniendo ya creados tantos *chunks* como configuraciones del modelo a escanear se vayan a utilizar, se pueden comenzar a añadir las fotografías. Para esto, es buena práctica tener ordenadas y clasificadas las imágenes previamente, en diferentes carpetas correspondientes a los diferentes *chunks*.

Para añadirlas, se puede proceder de dos formas: utilizando el menú *Workflow* de la barra superior, teniendo seleccionado el *chunk* donde queremos añadir las fotografías, o el que se sigue en las imágenes, que, personalmente, creo que se trata de un proceso más intuitivo. Se hace click derecho sobre el *chunk* en el que se van a añadir las imágenes y se selecciona *Add Photos*. Acto seguido aparece una ventana donde nos pide localizar y seleccionar las fotografías o carpeta de fotografías que se van a utilizar para dicho *chunk*.

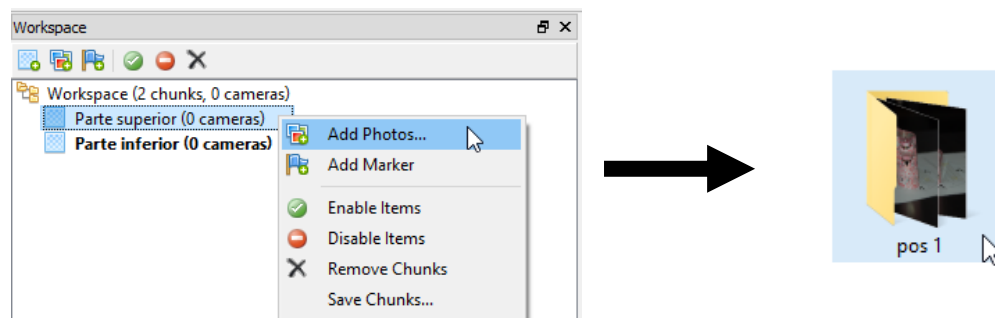


Figura 32: Proceso de adición de fotografías

Tras haber incorporado las fotografías, se pueden ver en su respectivo *chunk* haciendo doble click sobre el mismo, o bien haciendo aparecer el panel de *Photos* desde el menú superior → *View* → *Panes* → *Photos*.

#### 4.1.3 Aplicación de máscaras

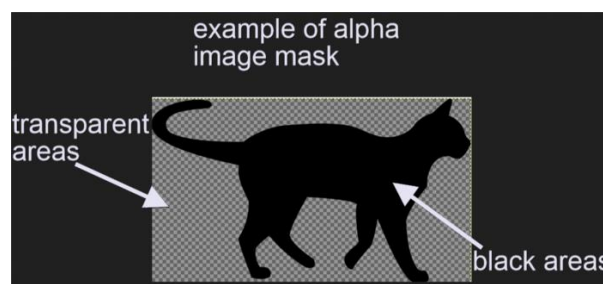
Para conseguir una buena reconstrucción del modelo, Agisoft recomienda aplicar a las fotografías una máscara a todos aquellos elementos irrelevantes como paisajes de fondo, la mesa giratoria sobre la que se trabaje, elementos no deseados o móviles... Una máscara es, por tanto, una capa de selección que se añade a la fotografía para señalar los elementos que no pertenecen al modelo y que puedan resultar confusos o desembocar en una reconstrucción incorrecta de los resultados.

El propio software permite aplicar la máscara a las fotografías. Para ello incluye una colección de herramientas de selección de píxeles típicas como son la selección rectangular, el lazo o la varita mágica, y de operaciones booleanas que nos permiten añadir o sustraer la selección a la máscara.



Aparte de estas herramientas, PhotoScan permite aplicar máscaras de forma más rápida y automática a partir de varias opciones presentes en el menú *Tools* → *Import* → *Import Masks...*

- **From Alpha:** a partir de una capa previa o máscara *alpha* que se haya realizado sobre las propias fotografías con la ayuda de otro software como Adobe Photoshop®. Básicamente, se trata de recortar la fotografía utilizando transparencias.

Figura 33: Máscara *Alpha* en una imagen

- **From File:** mediante un archivo de imagen donde esa misma capa *alpha* se deba aplicar a más de una fotografía (por ejemplo, cuando se tiene que añadir a la máscara la misma parte de varias fotografías). Por ejemplo, si tenemos la cámara montada de forma fija en un vehículo y aparece siempre la misma parte de dicho vehículo en las imágenes, tenemos la posibilidad de añadir la máscara de forma simultánea a todas esas fotografías.

- **From Background:** a partir de un archivo que contenga el fondo (*background*) que se va a utilizar en las imágenes. El software es capaz de reconocer dicho fondo y enmascararlo automáticamente.
- **From Model:** a partir del modelo 3D cuando este ya está creado y disponible, ya que la aplicación de máscara se puede realizar para alinear las diferentes cámaras, crear la nube de puntos o contruir el mallado del modelo. Así, si tenemos una cámara ya alineada con el modelo, que también esté creado y limpio de puntos residuales, el software puede enmascarar las fotos teniendo como referencia dicho modelo.

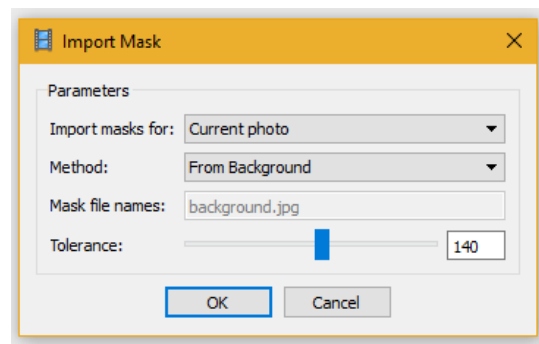


Figura 34: Ventana *Import Mask*

No obstante, en la pieza que se trata en el presente documento no se va a aplicar ninguna máscara por la simplicidad de la configuración con la que se han tomado las imágenes. Es necesario señalar que, a la hora de alinear las fotografías, se le puede indicar al programa que se tengan en cuentas las zonas enmascaradas, ya que estas pueden ayudar a situar las cámaras en el espacio tridimensional en ciertas configuraciones donde la pieza se mantenga fija y sea la cámara (o cámaras) las que realicen las instantáneas desde distintos ángulos, por lo que la información que no pertenece al modelo puede contener información relevante en relación a la situación de la cámara.

## 4.2 Alineación de fotografías y generación de la nube de puntos preliminar

El flujo de trabajo de PhotoScan es muy fácil de comprender. Dentro del propio programa se nos muestra ordenado en el menú *Workflow*, en la parte superior, todos los pasos necesarios para construir el modelo completo, como se muestra en la imagen:

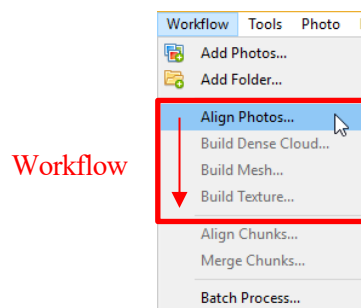


Figura 35: Proceso de flujo de trabajo o *workflow* típico de PhotoScan

Teniendo ya las fotografías añadidas a sus respectivos *chunks* y, si fuese necesario, correctamente enmascaradas, se pasa a la primera de las operaciones que conforma el conjunto *Workflow*, la alineación de las cámaras en el espacio tridimensional.

### 4.2.1 Alineación de cámaras

Con el *chunk* donde queramos alinear las cámaras seleccionado, procedemos a iniciar la operación de alineación de fotografías (*Align Photos...*), con lo que aparece la ventana *Align Photos*, que tiene la siguiente apariencia:

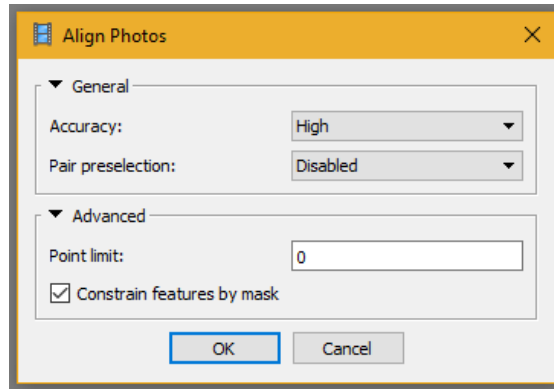


Figura 36: Ventana *Align Photos*

En ella se pueden seleccionar varias opciones que se proceden a explicar a continuación:

- **Accuracy:** una mayor precisión resulta en una alineación más precisa de las fotografías, a costa de un mayor tiempo de procesado. La opción *High* toma las fotos con su resolución original, mientras que cada nivel que se baja a partir de *High* la reduce en un factor de 4.
- La opción **Pair preselection** permite acelerar el proceso de alineación con conjuntos muy grandes de fotografías, haciendo una colocación preliminar, de baja precisión, teniendo en cuenta únicamente el solapamiento relativo entre pares de fotografías, para luego proceder a calcular la alineación con una mayor precisión.
- Si se extiende el contenido de la pestaña **Advanced**, nos aparece un cuadro donde se le puede indicar al software el máximo número de puntos (**Point limit**) que puede contener la nube de puntos preliminar o *Sparse point cloud*. Para tener una cota superior infinita de puntos, se puede introducir el número cero (0) en el cuadro, que es lo que se va a utilizar en este caso, al disponer de memoria suficiente para el número de fotografías utilizadas para este caso concreto.
- La caja **Constrain features by mask** hace que no se tengan en cuenta las zonas enmascaradas para alinear las fotos. Esto es útil para configuraciones como la que aparece en las imágenes inferiores, donde, al trabajar sobre una mesa rotatoria, el fondo aparece inmóvil mientras rota el modelo, por lo que no es de utilidad para alinear las fotografías, o incluso podría conducir a resultados erróneos.

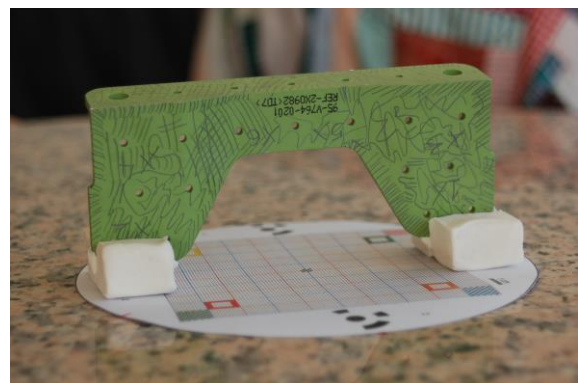


Figura 37: Al no rotar el fondo, si no simplemente la pieza, este no es de interés a la hora de alinear las fotografías



Para el ejemplo que se presenta en este documento, se ha seleccionado una precisión alta (*Accuracy* → *High*), *Pair preselection* activado para todas las fotografías (*Generic*) y sin límite de puntos (*Point limit* → 0), y la casilla *Constrain features by mask* sin activar, pues no se ha utilizado máscara en ninguna de las fotografías de las configuraciones, como ya se ha comentado anteriormente. Sabiendo la configuración seleccionada para el proceso de alineación, hay que señalar que el proceso de alineación se debe realizar tantas veces como *chunks* se tengan sobre cada uno de los chunks, en este proyecto en concreto, dos.

Con estos parámetros y para el *chunk* que se ha llamado “superior”, el proceso ha tardado un total de 27 minutos y 6 segundos en completar la alineación preliminar de la pieza, y se han obtenido un total de 60794 puntos en la nube de puntos dispersa.

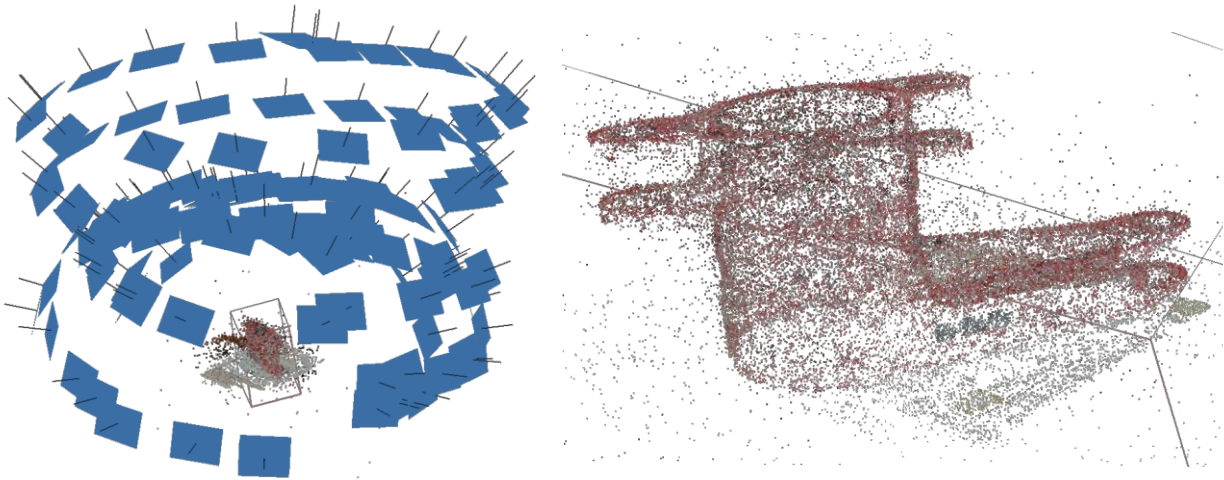


Figura 38: Alineación de las cámaras (izq.) y nube de puntos dispersa (dcha.) del *chunk* superior

Para el *chunk* inferior se han tardado 21 minutos y 9 segundos y se han generado 53099 puntos en la nube de puntos dispersa.

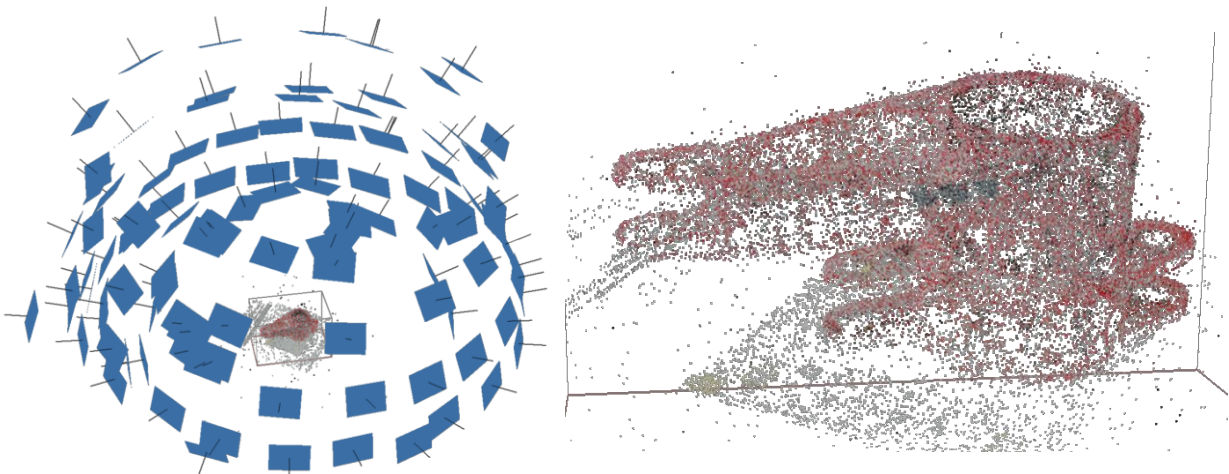
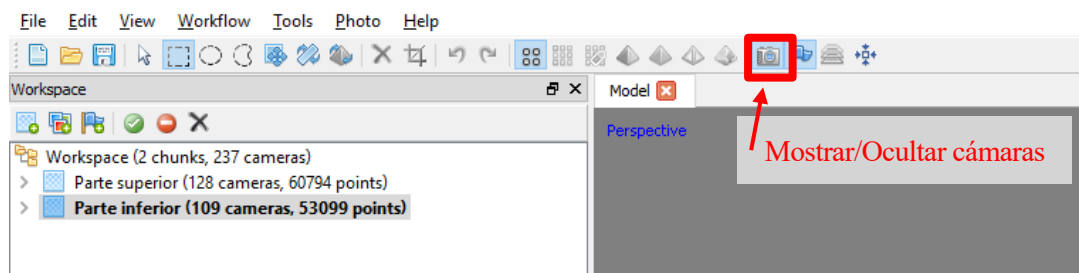


Figura 39: Alineación de las cámaras (izq.) y nube de puntos dispersa (dcha.) del *chunk* inferior

En las imágenes de la izquierda se puede observar la situación de las cámaras, es decir, la representación en el espacio tridimensional de PhotoScan desde donde el software ha interpretado que se han realizado las fotografías en relación a la posición del modelo. Para ver u ocultar estas cámaras, estas se pueden activar o desactivar desde la barra de herramientas superior, como se puede ver en la siguiente imagen, o en el menú *View* → *Show/Hide Items*.



Con esta configuración, la nube de puntos preliminar da una idea bastante clara de la disposición y la topología de la pieza en cuestión.

Como se ha comentado anteriormente, para otros de los modelos digitalizados en el desarrollo de este trabajo se ha utilizado una mesa giratoria. En estos casos, el resultado de la alineación de las fotografías refleja dicho proceso, como se puede ver en la Figura 40, donde se observan tres anillos de fotografías, de 32 imágenes cada uno, correspondientes a los tres niveles de altura desde los que se hacen las fotografías.

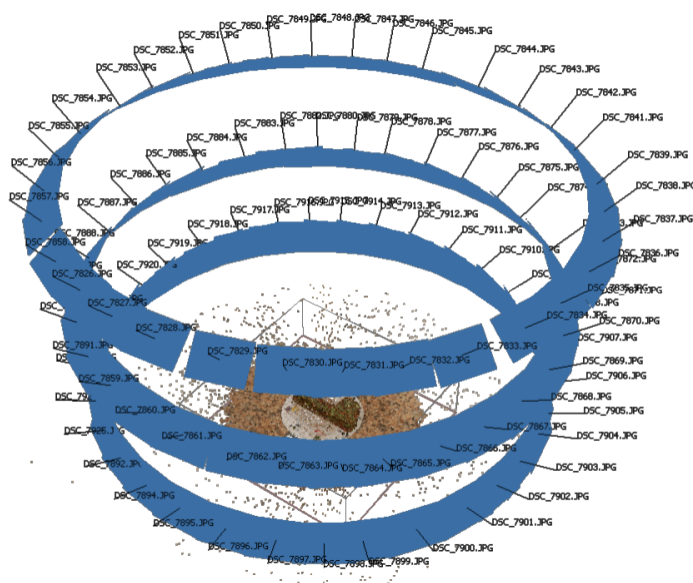


Figura 40: Alineación de las fotografías tomadas haciendo uso de una mesa giratoria

- Si, por alguna razón, **no se consigue que alguna de las fotos alinee con el modelo de forma automática**, se pueden utilizar marcadores para indicarle al software dónde se sitúa dicha cámara. Aun así, no se debe abusar de esto, pues si el algoritmo no ha conseguido alinear la fotografía, puede que esta no esté realmente bien enfocada o tenga mucho ruido, por lo que es recomendable desactivar dicha foto y que el programa no la tenga en cuenta en el proceso. Si, por el contrario, la foto contiene información de utilidad para el modelo y aun así no ha conseguido ser alineada en el espacio tridimensional, se pueden utilizar puntos de la imagen que sean fáciles de localizar (o que, como en este caso, se hayan marcado con anterioridad) para crear estos marcadores y triangular la posición de la imagen. También puede resultar conveniente utilizar una plantilla escalada como la que se puede observar en las imágenes utilizadas, que permite establecer marcadores claros y dotar al modelo de escala [24].

El primer paso es añadir dichos marcadores al modelo utilizando las fotografías que se encuentran alineadas. Esto se hace así de modo que el software pueda localizar los marcadores sobre el espacio tridimensional usando la posición de las fotografías ya alineadas, en las cuales aparece el marcador. Para añadir estos marcadores, es necesario situarse en el panel *Photos* (*View*→*Panes*→*Photos*), y hacer doble click sobre alguna de las fotografías en la cual se pretenda añadir el marcador. Haciendo click derecho sobre el lugar donde se quiere crear el marcador, aparece la opción *Create Marker*. Este se puede mover arrastrándolo con click izquierdo, o eliminar o renombrar con el menú que aparece al hacer click derecho.

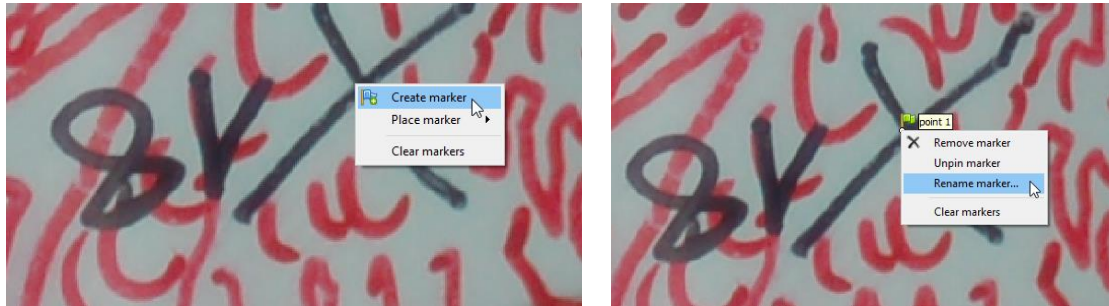


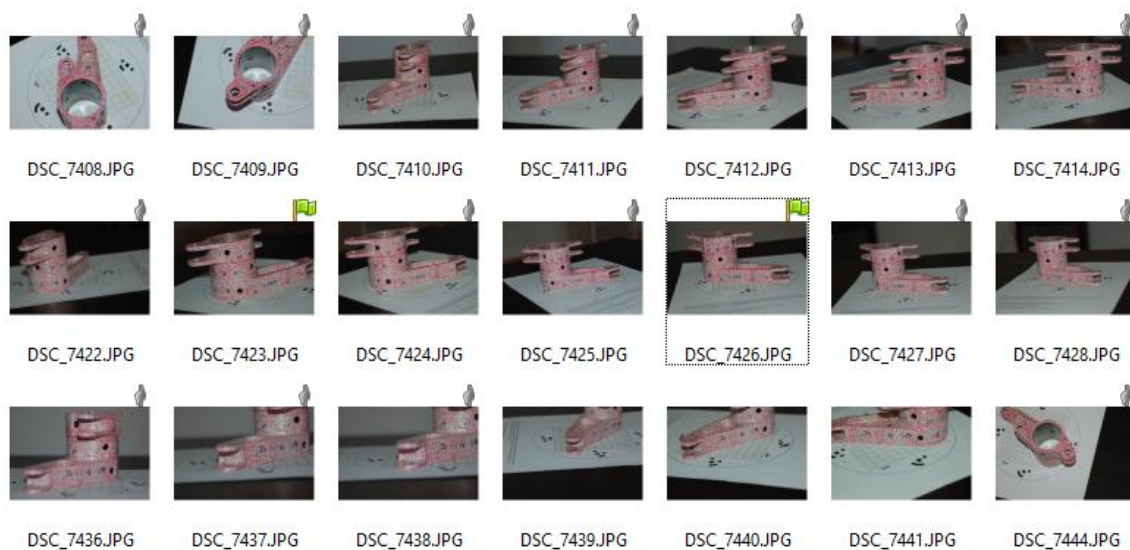
Figura 41: Crear y renombrar un marcador

Una vez creado el marcador, hay que situarlo en alguna fotografía más para que el software determine una posición para el punto del marcador. Con la fotografía lista, se vuelve a hacer click derecho en la posición del marcador y se coloca el ya creado, pero esta vez en esta otra fotografía con la opción *Place marker*.



Figura 42: Determinación del marcador “18”, ya creado.

Tras colocar el marcador en dos o más imágenes, el software intuye la posición de este. Es necesario que estos puntos que se pretenden convertir en marcadores deben de poderse ver desde varias fotografías, para que el algoritmo del software pueda localizarlos en el espacio tridimensional.

Figura 43: Panel *Photos* tras la localización de un marcador

En la Figura 43 se puede observar que algunas de las fotografías cuentan con una marca de una bandera



ondeante verde. En dichas fotos se han colocado manualmente marcadores, mientras en las que aparecen con la bandera gris, los marcadores quedan colocados automáticamente en la fotografía por el software. Tras esto se puede observar el marcador en el espacio tridimensional, sobre el modelo (Figura 44).

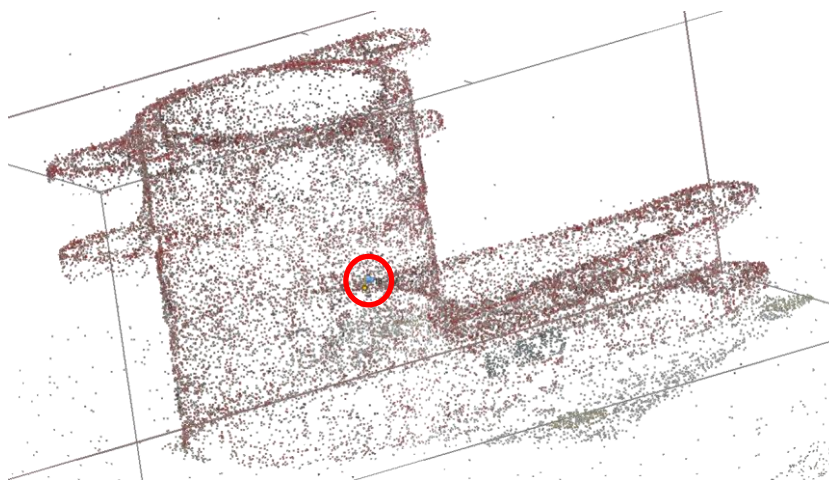


Figura 44: Marcador “18” en el espacio tridimensional

Para alinear una fotografía no alineada automáticamente, se localizan algunos de los marcadores que ya se conocen en el modelo sobre dicha imagen, siguiendo el mismo procedimiento ya explicado (a un mayor número de marcadores se conseguirá una alineación más precisa de la fotografía, aunque con 3-4 marcadores bien espaciados suele ser suficiente). Tras esto, se hace click derecho sobre la fotografía en cuestión en el panel *Photos* y se elige la opción *Align Selected Cameras*.

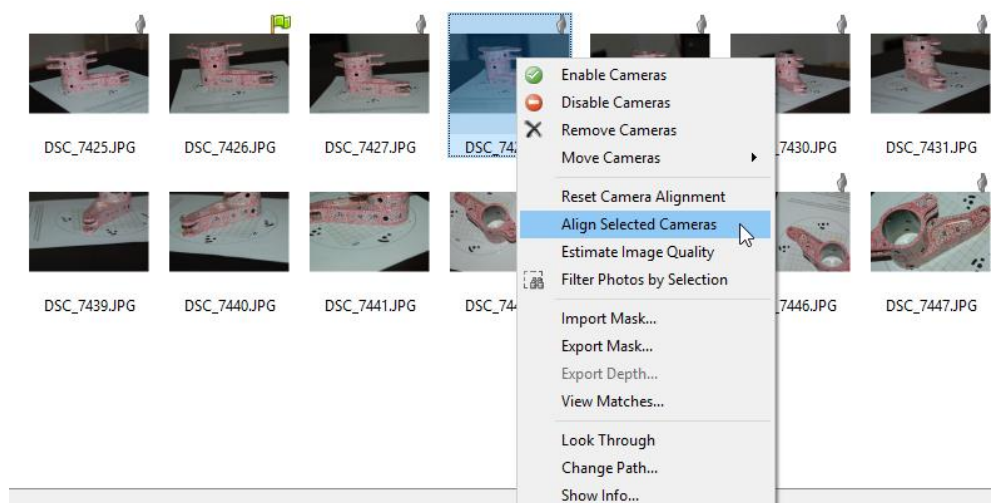


Figura 45: *Align Selected Cameras*

A modo de comparación, se utiliza la misma configuración para la alineación de las fotografías modificando la precisión en sus otras dos opciones: Media y Baja.

Para una precisión media, el *chunk* superior tarda en alinear 7 minutos y 1 segundo, y se consigue una nube de puntos dispersa de 34150 puntos, y el *chunk* inferior tarda 4 minutos y 42 segundos y se obtienen 29316 puntos en la nube.

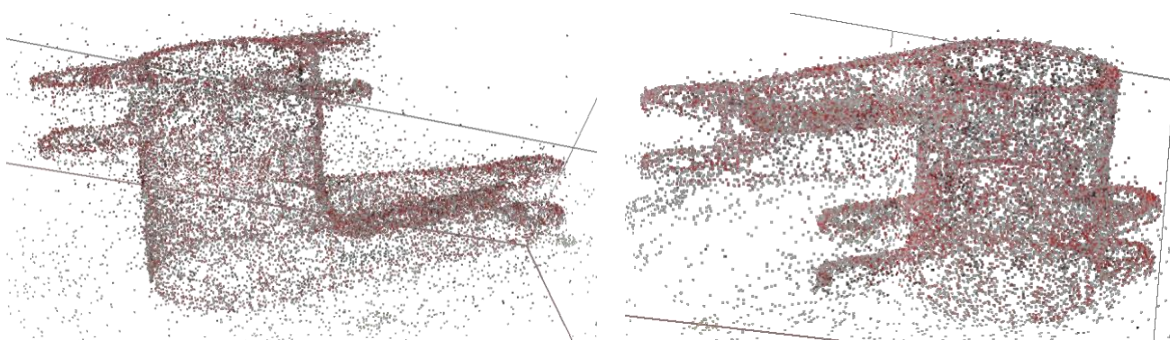


Figura 46: Nubes de puntos dispersas del *chunk* superior (izq.) y *chunk* inferior (dcha.) con precisión media

Para una precisión baja, el *chunk* superior tarda en alinear 2 minutos y 16 segundos, y se consigue una nube de puntos dispersa de 7676 puntos, y el *chunk* inferior tarda 1 minuto y 22 segundos y se obtienen 4575 puntos en la nube.

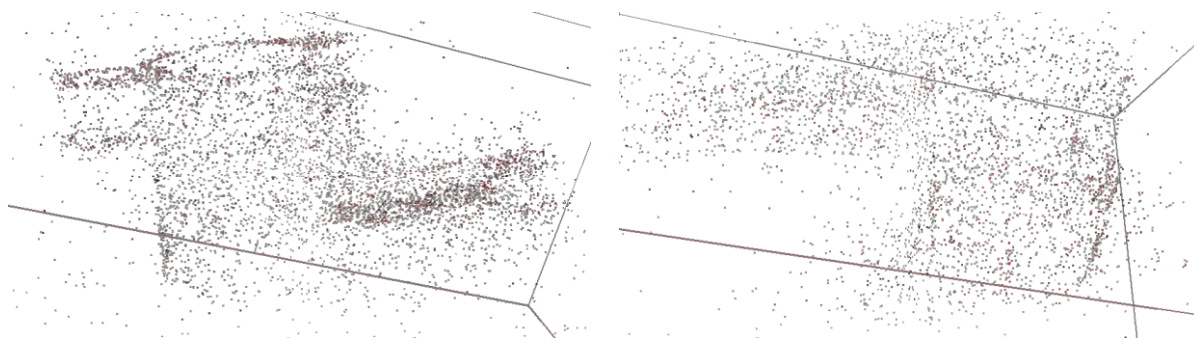


Figura 47: Nubes de puntos dispersas del *chunk* superior (izq.) y *chunk* inferior (dcha.) con precisión baja

Como se puede observar en las imágenes, la nube de puntos se hace cada vez más difusa según se va disminuyendo la precisión del proceso de alineación. El número de puntos y los tiempos obtenidos se representan en las siguientes gráficas.

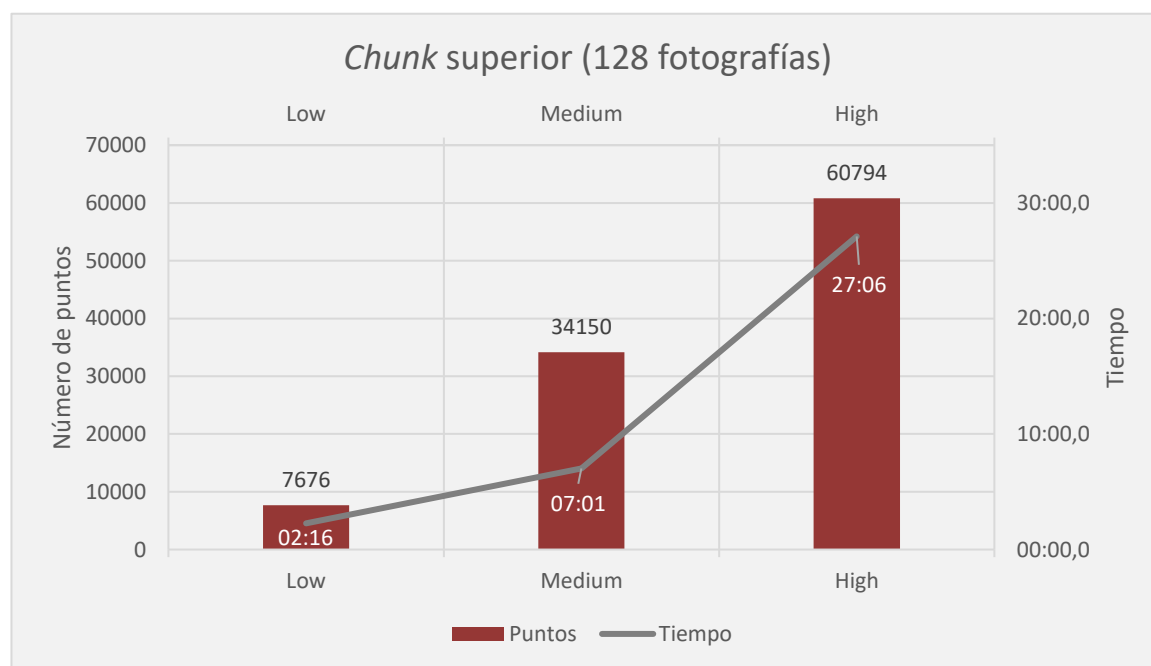


Figura 48: Gráfica nº puntos y tiempo frente a calidad para el *chunk* superior

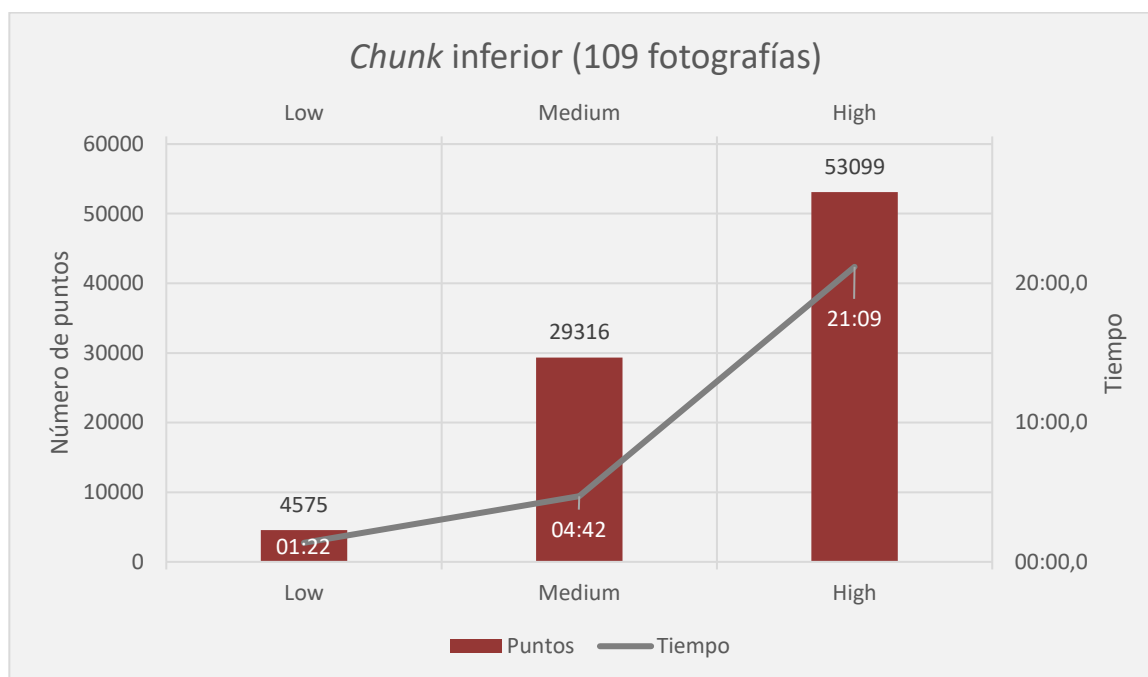


Figura 49: Gráfica n° puntos y tiempo frente a calidad para el *chunk* inferior

Observando los resultados obtenidos con la ayuda de las gráficas, se pueden sacar algunas conclusiones. Es necesario indicar que estos resultados pueden variar dependiendo del equipo y la configuración con que se realiza el proceso, y de la composición y número de fotografías.

En general, el número de puntos obtenidos es muy pobre. Personalmente, creo que puede deberse a mi inexperiencia con la fotografía o a no tener los medios correctos, pues las fotografías no cuentan con la nitidez que considero aceptable para trabajar con el programa.

En primer lugar, en el caso del modelo con el que se trabaja en este ejemplo y de los medios ya comentados en el apartado 1, se observa que, al aumentar el nivel de precisión entre los tres que nos ofrece PhotoScan, se produce un número creciente de puntos prácticamente lineal, aumentando la nube de puntos dispersos en unos 20000 por cada escalón que se progresa.

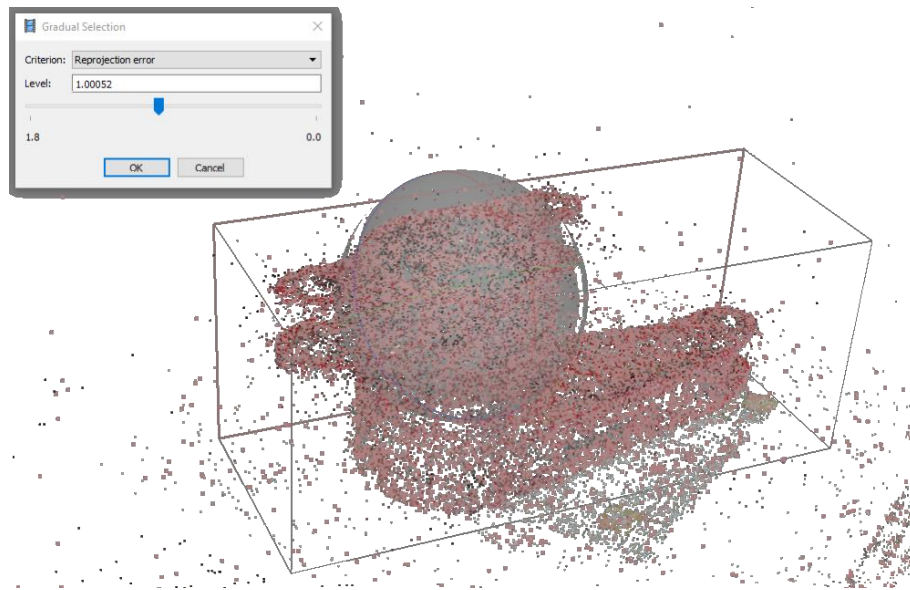
No se puede decir lo mismo del tiempo de procesado, pues se puede comprobar que el crecimiento de este es exponencial con cada nivel de precisión que se incrementa. En el último nivel de precisión (*High*) se consiguen diez veces más puntos que en el primero (*Low*), mientras que el tiempo se multiplica por veinte. Aun así, se va a seguir trabajando con esta última nube de puntos, pues la densidad obtenida con las otras dos configuraciones no es suficiente para poder continuar con el proceso de digitalizado de la pieza, y el de este último tiene una densidad aceptable para continuar, si bien se podría haber alcanzado una nube preliminar de más puntos con el mismo número de imágenes si estas tuviesen una mayor nitidez.

#### 4.2.2 Filtrado de puntos en la nube dispersa

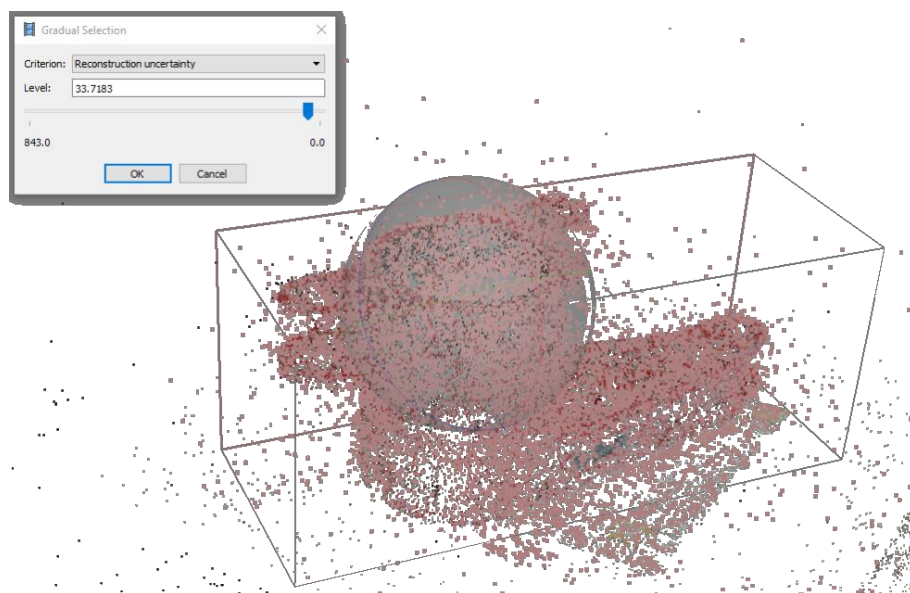
En algunos casos resulta útil encontrar dónde se encuentran los puntos que aparecen en la nube dispersa con un gran error de reproyección o eliminar los puntos que muestran una gran cantidad de ruido. Para esto, el filtrado de puntos que incorpora el software resulta práctico para seleccionar dichos puntos, que son normalmente descartados de la nube.

Entre los criterios de filtrado de puntos que incorpora PhotoScan en esta versión se encuentran los siguientes:

- **Reprojection error.** Un alto valor de este indicante normalmente señala una pobre precisión en la localización de las correspondientes proyecciones de los puntos a la hora de emparejarlas. También es síntoma de falsos positivos en las localizaciones de dichos puntos. Eliminar estos puntos puede desembocar en una mejora de la precisión y la optimización de los pasos subsiguientes.

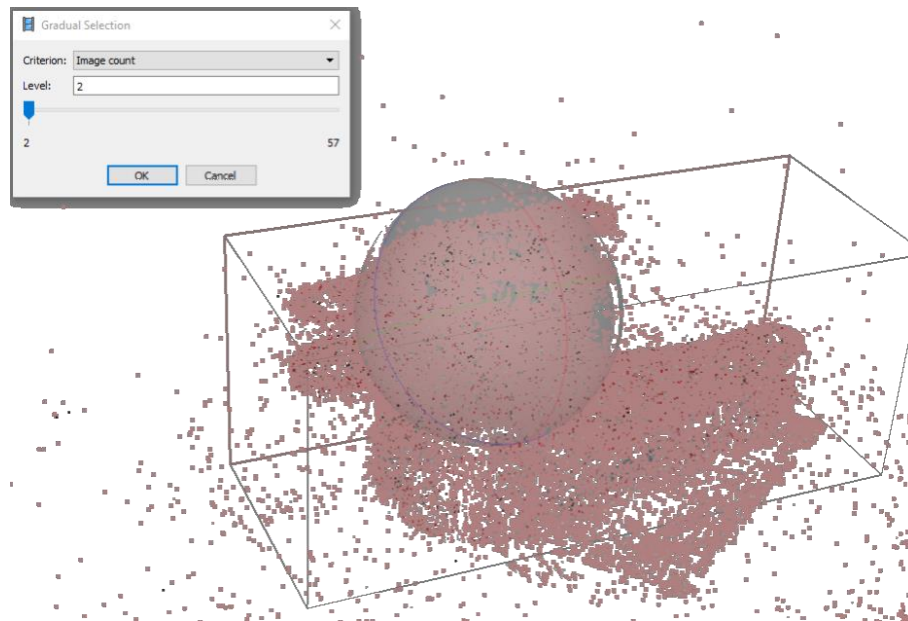
Figura 50: Filtro *Reprojection error*

- ***Reconstruction uncertainty.*** Un alto valor de este indicante es típico en puntos con gran incertidumbre, reconstruidos a partir de fotos cercanas. Dichos puntos pueden separarse notablemente de la superficie real del objeto de la digitalización, introduciendo ruido en la nube de puntos. Aunque no afecta notablemente a la optimización o a la precisión, eliminarlos antes de construir la geometría produce una apariencia más fiel al modelo original.

Figura 51: Filtro *Reconstruction uncertainty*

- ***Image count.*** PhotoScan reconstruye todos los puntos que son visibles desde al menos dos fotografías. Sin embargo, puntos que sólo son visibles desde dos fotografías dan lugar a reconstruirlos con poca precisión. Esta opción permite filtrar estos puntos poco fiables de la nube.



Figura 52: Filtro *Image count*

Tras realizar dicho filtrado (exceptuando el criterio de cantidad de imágenes) se obtiene un *chunk* superior de 38879 puntos y un *chunk* inferior de 32748

### 4.3 Creación y procesado de la nube de puntos

#### 4.3.1 Generación de la nube densa de puntos

El siguiente paso que nos marca el flujo de trabajo de PhotoScan es el cálculo y la construcción de la nube densa de puntos. Este proceso pretende aumentar la densidad de puntos de la nube dispersa obtenida en la alineación preliminar de las fotografías. Para ello, el software calcula información sobre la profundidad en cada cámara y la combina para realizar la construcción de una única nube de puntos.

Para construir la nube de puntos, en primer lugar, conviene delimitar el espacio que ocupa realmente la pieza que pretendemos digitalizar. Para ello, PhotoScan muestra las aristas de un prisma rectangular que ha de contener el modelo final, el cual ya puede percibirse en la nube de puntos dispersa. Dicho prisma se circula en morado en la Figura 53.

Para modificar la posición, la rotación y la escala de dicho prisma se utilizan las opciones que se encuentran en la barra de herramientas superior. La localización de estas se indica también en la Figura 53.

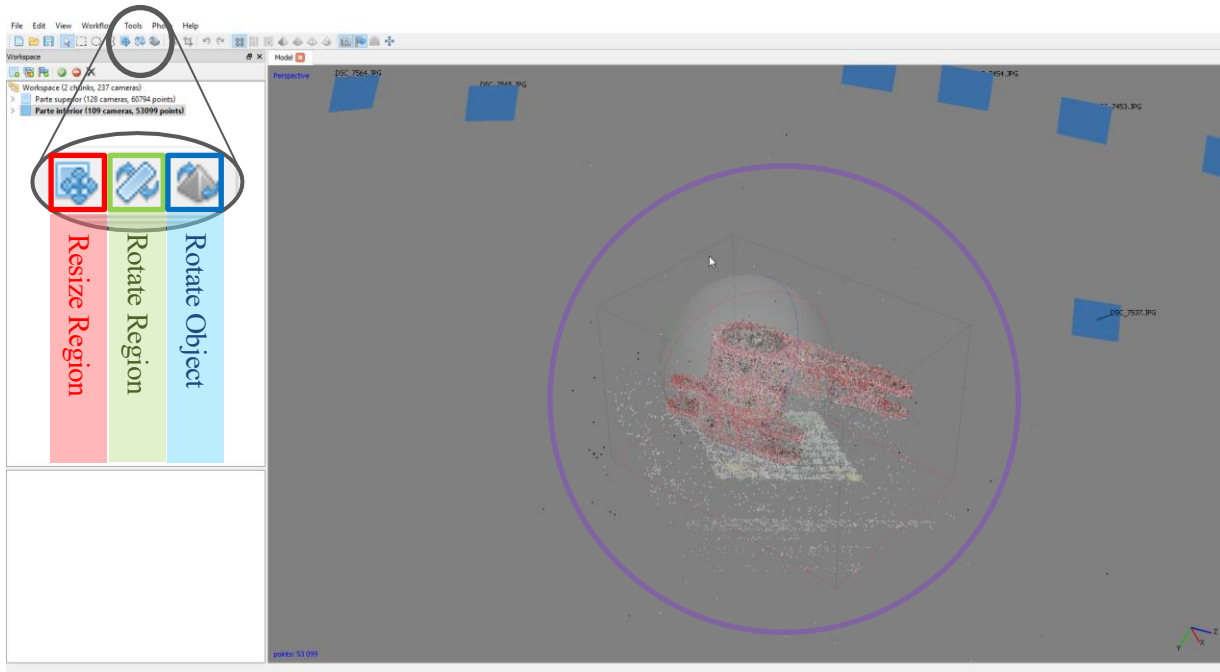


Figura 53: Herramientas de transformación del prisma delimitador

Usando estas herramientas se consigue adaptar la región a la geometría que se pretende digitalizar: girando, escalando y ajustando el espacio que delimita el esqueleto de este prisma. Para esta tarea resulta especialmente útil emplear el renderizado en perspectiva ortográfica. Para pasar a este tipo de visualización, se puede cambiar entre ambos tipos de renderizado con la tecla numérica “5”, o desde el menú *View* → *Perspective/Orthographic*. También es de utilidad la tecla “Espacio” para pasar entre la herramienta que se tenga seleccionada (por ejemplo, cualquiera de las opciones de modificación del prisma que delimita el volumen) y el modo de navegación 3D.

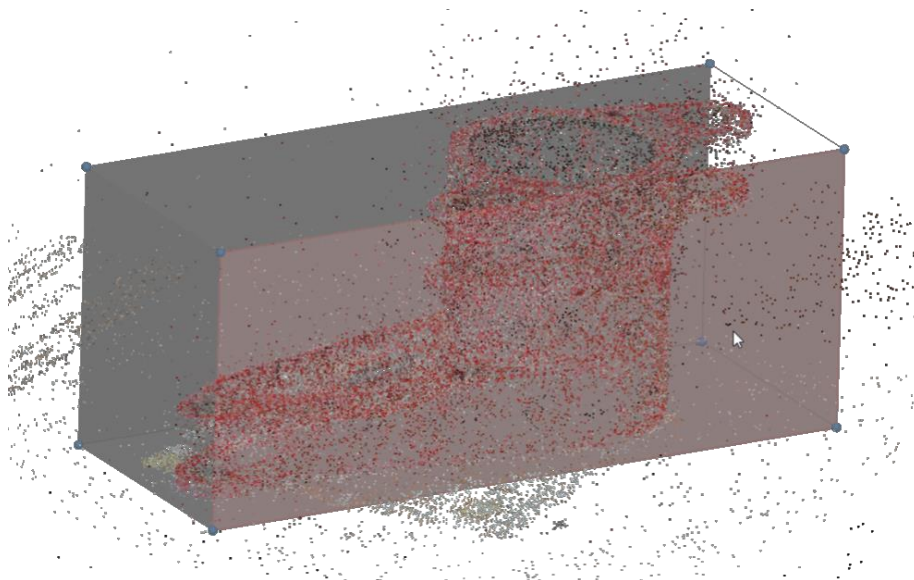
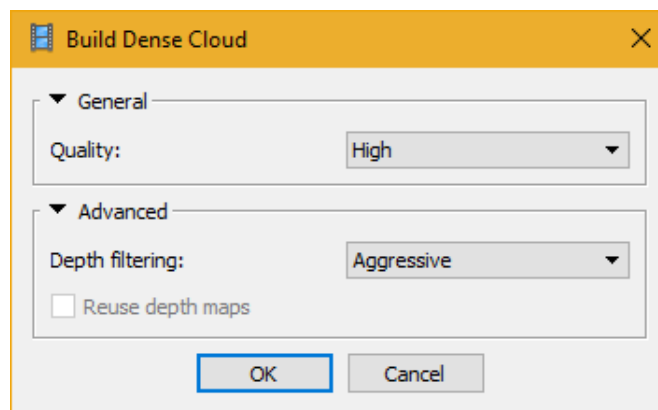


Figura 54: Confinado del modelo en el prisma delimitador

Ya con el modelo debidamente delimitado, se pasa a construir la nube densa de puntos. Haciendo click de nuevo en la pestaña *Workflow* se selecciona este siguiente paso: *Build Dense Cloud*. Al hacer click aparece una nueva ventana que, al igual que en el caso de la alineación de las cámaras, admite una nueva serie de parámetros y configuraciones que se pasan a explicar a continuación:

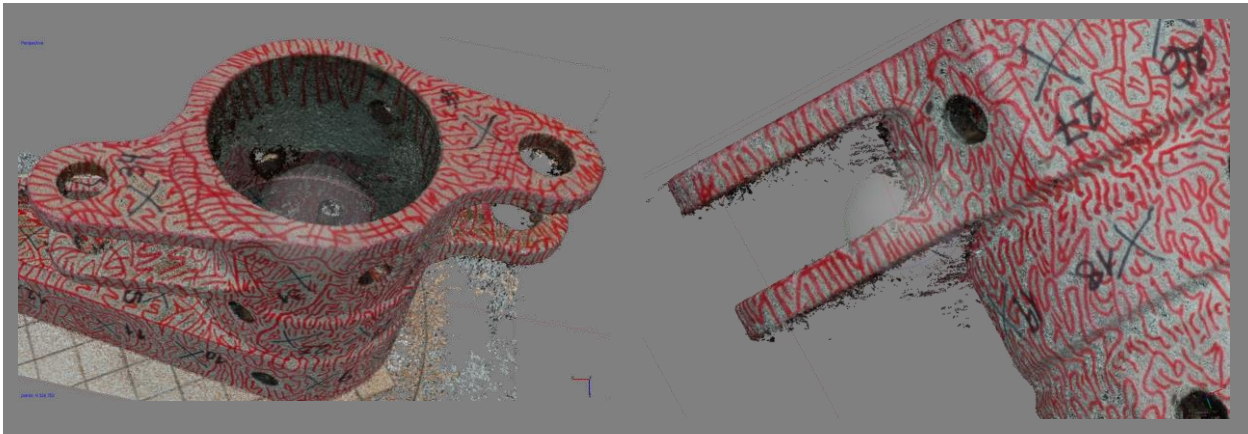
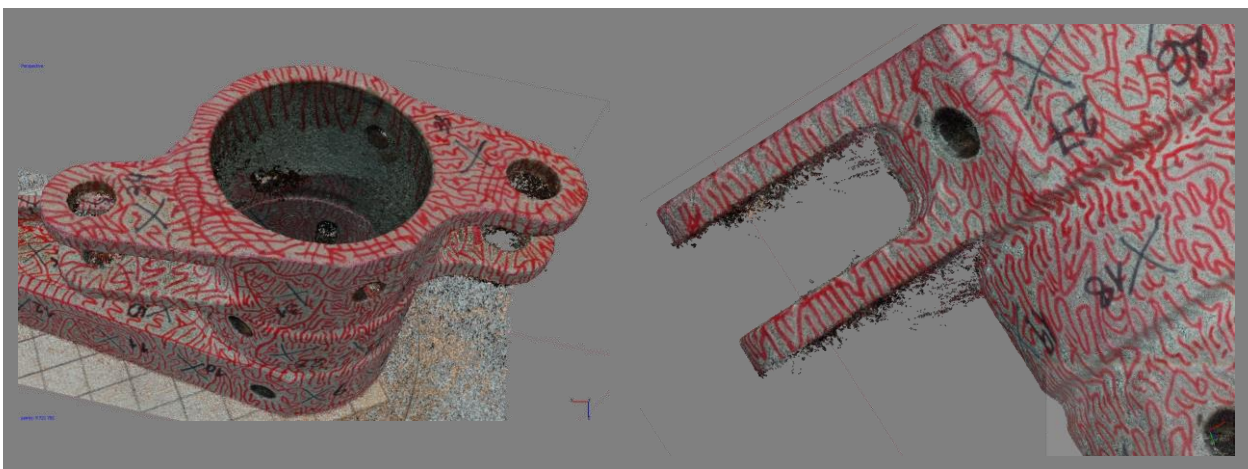
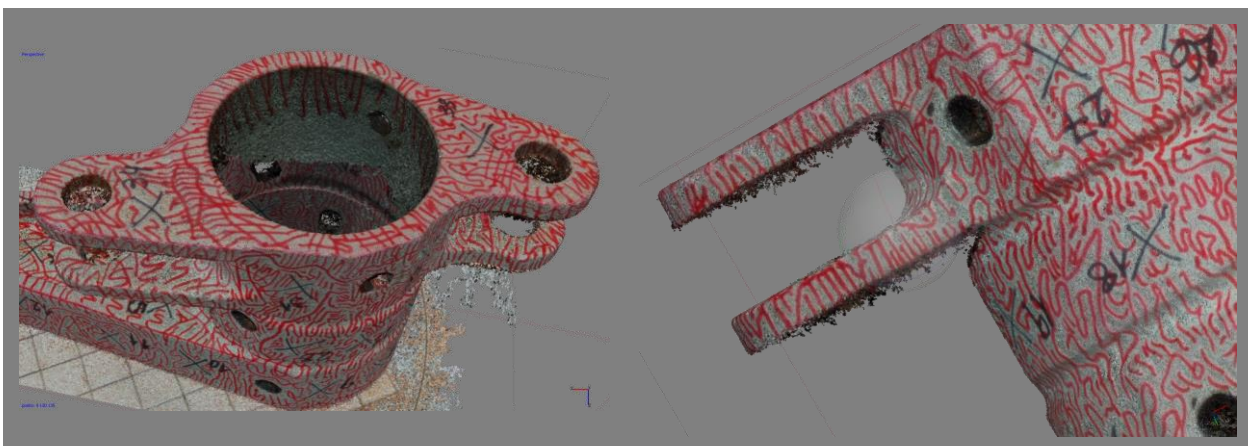
Figura 55: Ventana *Build Dense Cloud*

- **Quality:** calidad de la reconstrucción deseada. Una mayor calidad requiere de un mayor tiempo de procesado. Al igual que pasaba con la opción *Accuracy* en el alineamiento de las cámaras, la opción *Ultra High* toma las fotos en su resolución original, mientras que en cada nivel de calidad que se baja el software reduce el tamaño de las imágenes en un factor de 4.
- **Depth filtering:** esta opción aparece al desplegar la pestaña *Advanced*. A la hora de reconstruir la nube de puntos, PhotoScan calcula mapas de profundidad para cada imagen. Debido a factores como elementos con una textura difícil de captar o pobre, fotografías mal enfocadas o con ruido, puede que algunos de los puntos se sitúen en una zona aislada, no cercana a otros puntos. Para filtrar dichos puntos, esta opción aplica ciertos algoritmos a la hora de reconstruir la nube para obtener el resultado deseado:
  - Si la geometría que se va a reconstruir es compleja y con pequeños detalles en primer plano, es recomendado que se seleccione la opción *Mild* (Suave) como opción de filtrado, para que dichas características no se pierdan.
  - Si la geometría que se va a reconstruir no contiene pequeños detalles, es recomendado seleccionar la opción *Aggressive* como opción de filtrado para eliminar estos puntos filtrados.
  - *Moderate* es una opción intermedia.

En la siguiente tabla se muestran, para el *chunk* superior, los tiempos y puntos obtenidos con las diferentes opciones disponibles.

	Mild		Moderate		Aggressive	
<b>Ultra High</b>	4h 57m 6s	9361356	5h 25m 33s	9764747	5h 12m 46s	9130135
<b>High</b>	49m 51s	2402987	58m 32s	2431493	1h 4m 18s	2362163
<b>Medium</b>	15m 56s	603305	14m 30s	617393	14m 52s	612674
<b>Low</b>	3m 15s	151644	3m 30s	154829	3m 50s	156662
<b>Lowest</b>	1m 7s	37802	1m 11s	39055	1m 15s	39818

Tabla 2: Tiempos y cantidad de puntos con diferentes configuraciones para la construcción de la nube densa de puntos

Figura 56: *Ultra High / Mild*Figura 57: *Ultra High / Moderate*Figura 58: *Ultra High / Aggressive*

En estas imágenes se puede observar de manera clara el efecto del *Depth filtering*. Al ir aumentando el nivel del filtro desde *Mild* hasta *Aggressive*, se comprueba, sobre todo en las imágenes de la derecha, el efecto de esta herramienta y cómo resulta finalmente en la nube de puntos. El resultado de la calidad de la superficie de la pieza es prácticamente idéntico en todos los niveles de filtrado, pero se consigue eliminar puntos no deseados en las zonas donde, por la configuración de la toma de fotografías, no se tiene información suficiente para determinar con certeza la existencia de los puntos (son las zonas que quedan en la sombra de la cámara, como la que se muestra en las imágenes).



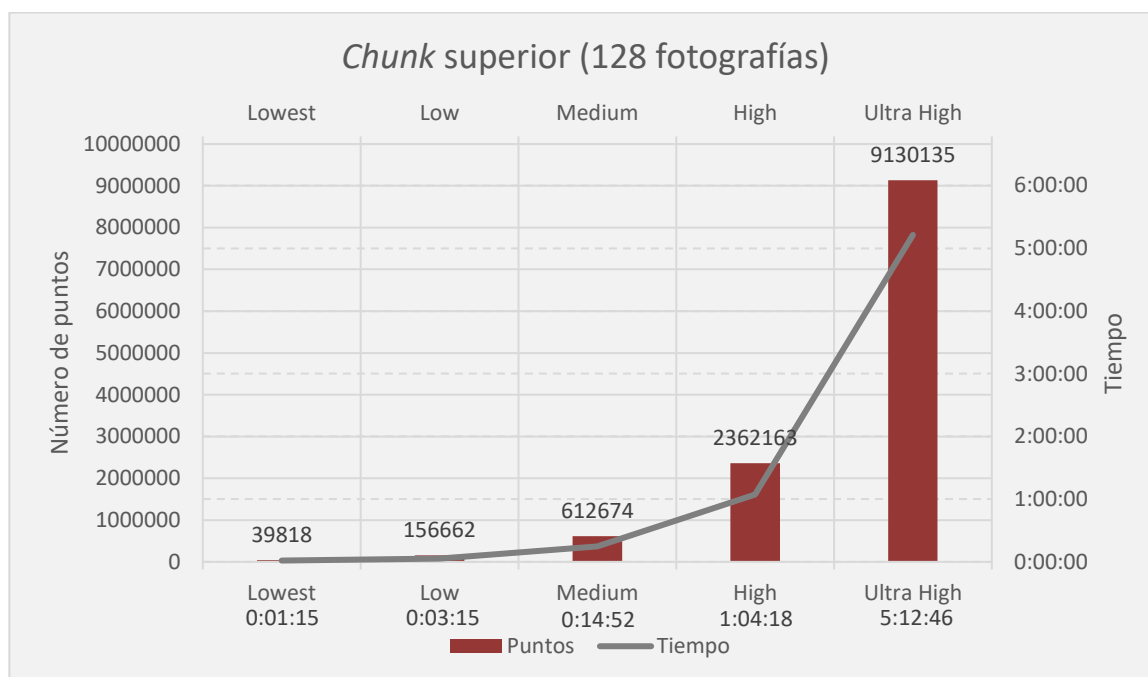


Figura 59: Relación n.º de puntos y tiempo frente a la calidad del proceso

En la gráfica se observa, a diferencia de lo obtenido en el caso del proceso de alineación, un crecimiento exponencial tanto en el caso de los puntos como en los tiempos de procesamiento al aumentar la calidad del proceso de reconstrucción de la nube de puntos.

#### 4.3.2 Limpieza de la nube densa de puntos

Es necesario eliminar todos los puntos que no forman parte del modelo que se busca y pueden terminar empeorando el modelo final. Para eliminarlos, primero se utiliza cualquiera de las herramientas de selección típicas que nos ofrece PhotoScan:

Navegación/Selector individual  Selección de forma libre  
 Selección rectangular Selección circular

En las siguientes imágenes se muestran ejemplo del uso de cada una de estas herramientas:

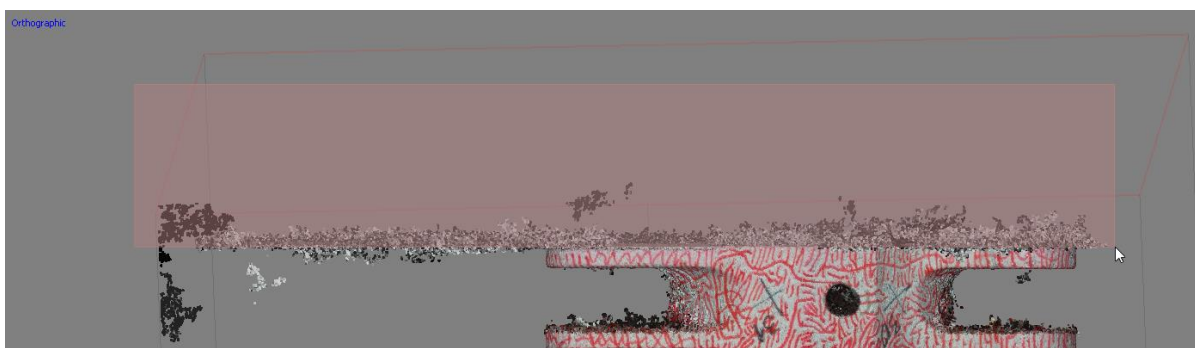


Figura 60: Selección rectangular

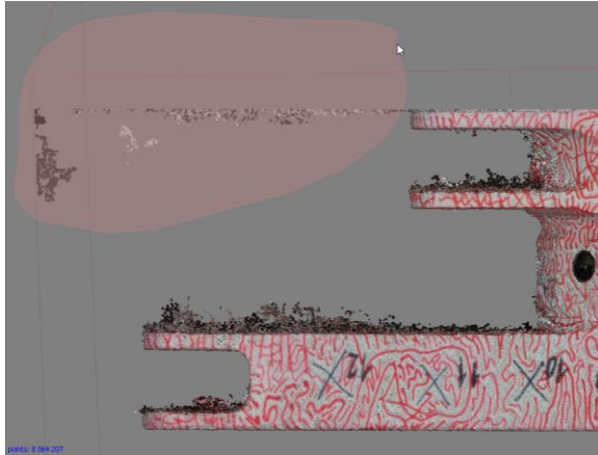


Figura 61: Selección de forma libre

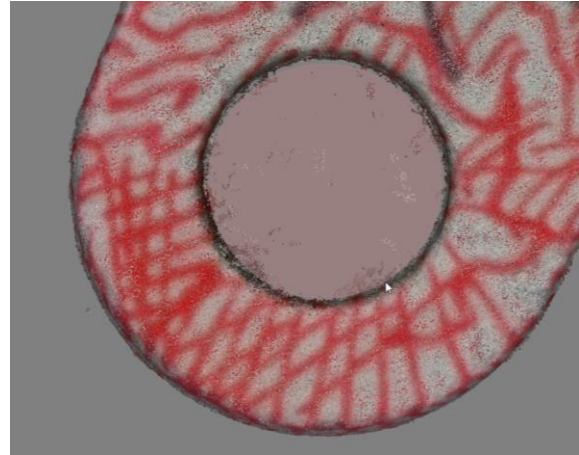
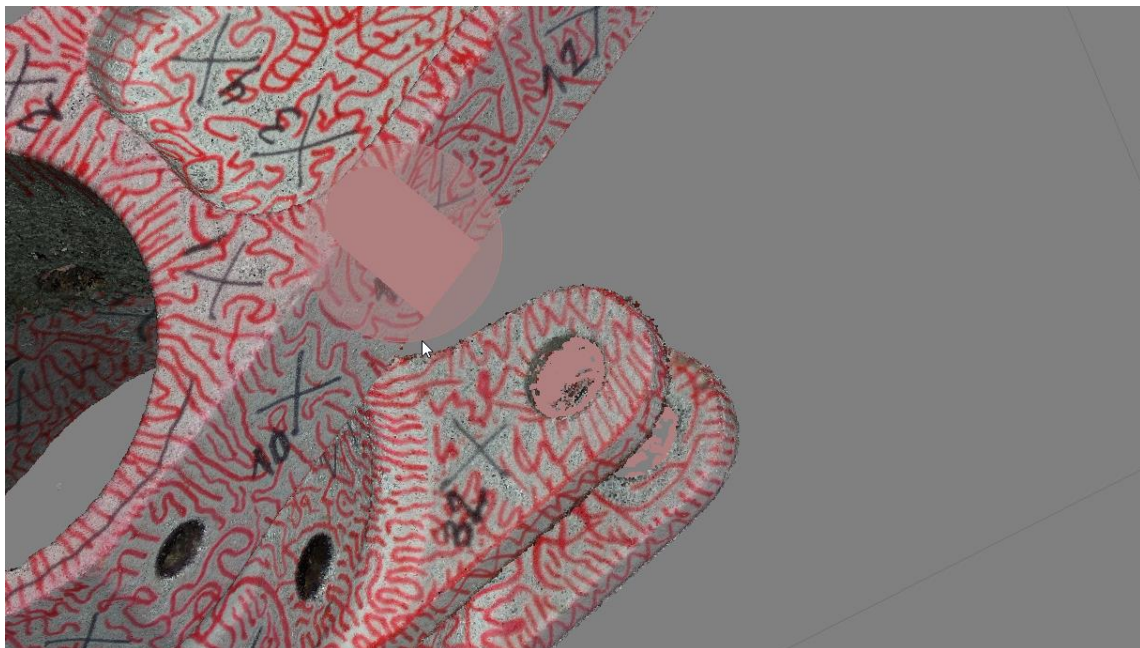


Figura 62: Selección circular

Como se puede ver, se han de eliminar todos los puntos que no sean de utilidad para construir el mallado del modelo, como por ejemplo los puntos captados de la superficie de apoyo o los que aparecen dentro de los agujeros de la pieza, que se eliminan con la herramienta de selección circular.

En casos como el representado en la Figura 63, para excluir puntos no deseados en la selección se utiliza la herramienta de selección manteniendo la tecla *Shift* (“Mayús”).

Figura 63: Deselección de puntos no deseados usando la tecla *Shift*

Si en el modelo se tiene más de un *chunk*, es recomendable limpiar la nube de puntos después de haber alineados los *chunks* (este proceso se muestra en el siguiente apartado). Tendiéndolos alineados, se puede pasar de un *chunk* a otro para comparar ambas nubes de puntos y seleccionar aquellos puntos que representen más fielmente al modelo en una zona concreta. Esto se muestra en las siguientes imágenes

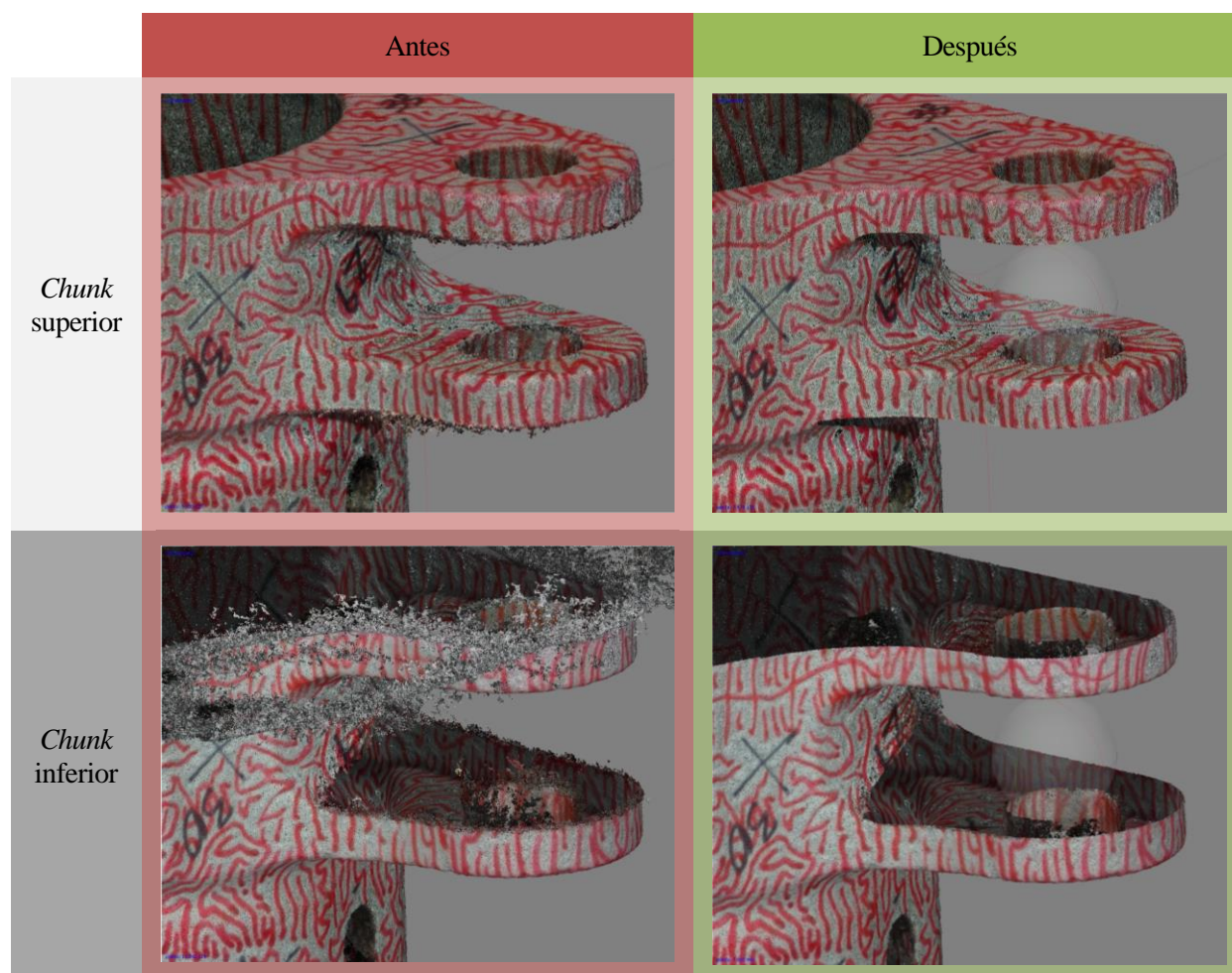


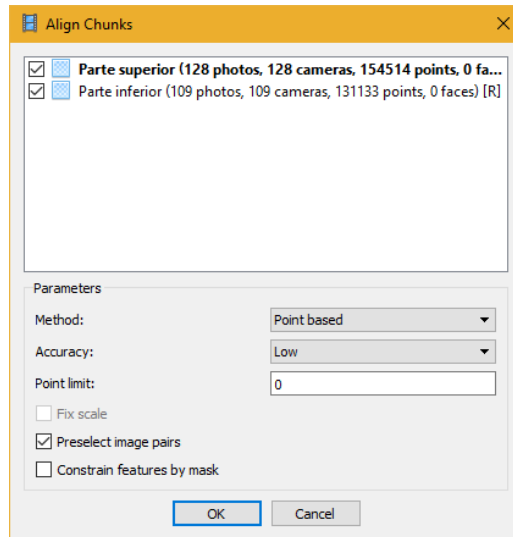
Figura 64: Limpieza de puntos en ambos *chunks*

Lo que se ha hecho en este caso es limpiar la parte inferior en el *chunk* superior y viceversa, ya que estos puntos eliminados se representan mejor en el otro *chunk* complementario.

#### 4.3.3 Alineación de los *chunks*

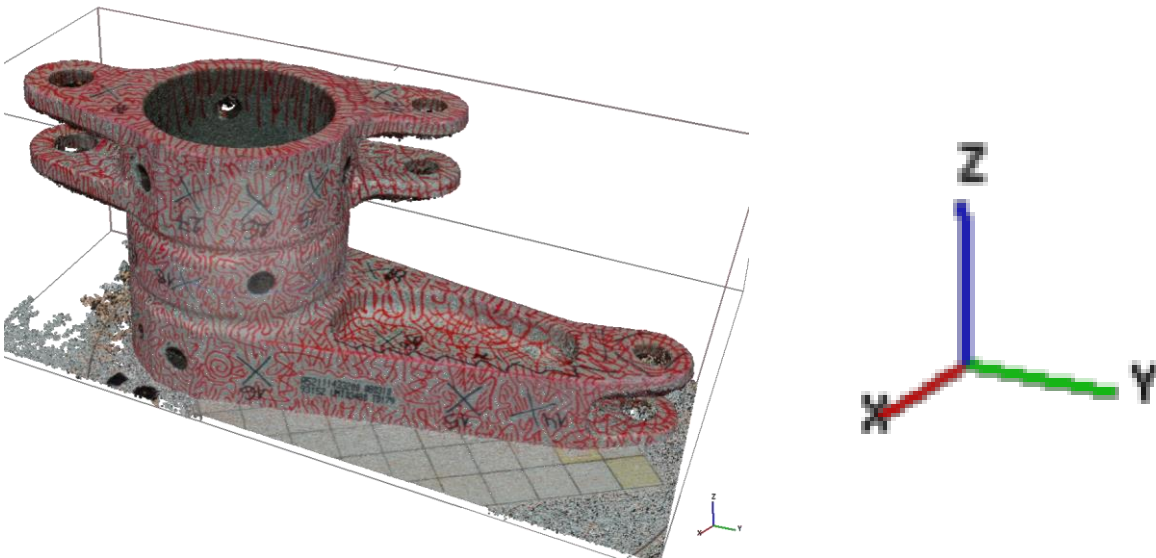
Si se alterna entre los diferentes *chunks* (si se tiene más de uno en el proyecto en cuestión) que se consiguen hasta este punto del proceso de digitalización, se puede comprobar que estos no coinciden unos con otros en el espacio tridimensional para formar el modelo final que se busca. Para conseguir esto es necesario alinear los *chunks* y, con ellos, todos los elementos que contienen, como las posiciones de las fotografías y las nubes de puntos.

Esto se consigue utilizando la función *Align chunks*, que se encuentra en el menú *Workflow* de la barra superior. Al seleccionarla aparece la ventana de la herramienta, que se muestra en la siguiente imagen:

Figura 65: Ventana *Align Chunks*

Entre los parámetros de configuración se encuentran:

- **Lista de *chunks*:** se seleccionan los *chunks* que se pretenden alinear.
- ***Method*:** base de cálculo para buscar coincidencias entre los chunks. Se puede seleccionar entre:
  - ***Point based*:** el software busca la correspondencia de las fotografías en los *chunks* a alinear. Si se selecciona esta opción, es recomendable que los *chunks* a alinear tengan una orientación relativamente cercana a la que tienen en la realidad para evitar solapamientos erróneos. Esto se hace usando la herramienta *Rotate Object* y haciendo coincidir el triedro de la esquina inferior derecha en ambos *chunks*, como se muestra en las imágenes:

Figura 66: Orientación del *chunk* superior



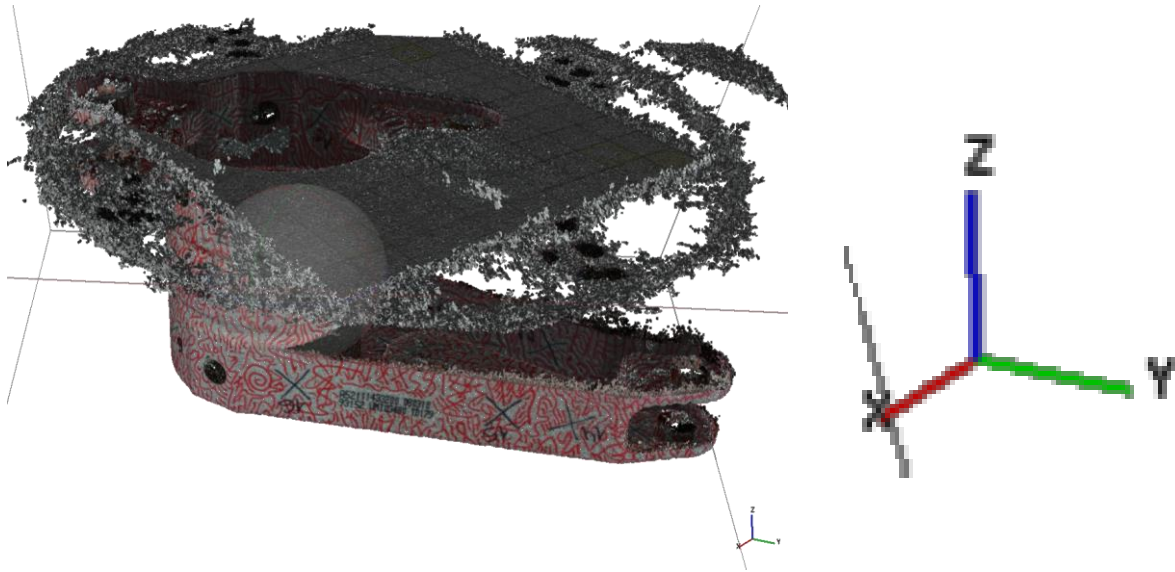


Figura 67: Orientación del *chunk* inferior

Tras esto se puede iniciar el proceso de alineación automático con los parámetros seleccionados.

- **Marker based:** el software busca la superposición de los marcadores comunes creados en ambos chunks. El proceso para añadir marcadores es el mismo que el que se explica en el apartado de alineación de las fotografías.

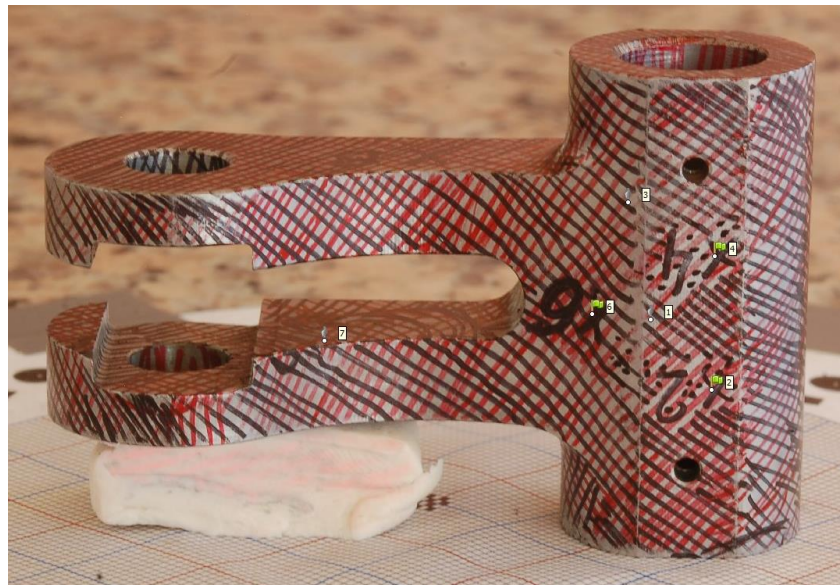


Figura 68: Fotografía de la pieza 3 con marcadores posicionados

Es necesario crear los marcadores en ambos *chunks* y definirlos con el mismo nombre, para así conseguir que los que compartan la misma etiqueta queden alineados.



Figura 69: Ambos *chunks* con los mismos marcadores tras alinearlos

- **Camera based:** el software toma como referencia la estimación de las posiciones de las cámaras. Las cámaras emparejadas deberían tener el mismo nombre
- **Accuracy (sólo en el método de alineación por puntos):** una mayor precisión resulta en una alineación más precisa de los *chunks*, a costa de un mayor tiempo de procesado.
- **Point limit:** fija el límite superior del número de puntos que se toman en cuenta durante la alineación de *chunks* basada en puntos.
- La opción **Presselected image pairs (sólo en el método de alineación por puntos)** permite acelerar el proceso de alineación con conjuntos grandes de *chunks*, haciendo una búsqueda preliminar, de baja precisión, de las características de las fotografías, para luego proceder a calcular la alineación con una mayor velocidad.
- La caja **Constrain features by mask (sólo en el método de alineación por puntos)** hace que no se tengan en cuenta las zonas enmascaradas para alinear los *chunks*.

#### 4.3.4 Unión de los *chunks*

Una vez se tienen los *chunks* alineados y sus respectivas nubes de puntos limpias, se han de combinar previamente a la construcción del mallado, dando como resultado un nuevo *chunk* con una nube de puntos que engloba a las nubes originales. El *chunk* que resulta de este proceso se guardará como un *chunk* nuevo aparte de los ya existentes, pudiendo así comprobar los resultados sin perder los *chunks* de partida. Esta opción se encuentra en el menú *Workflow* → *Merge Chunks*...

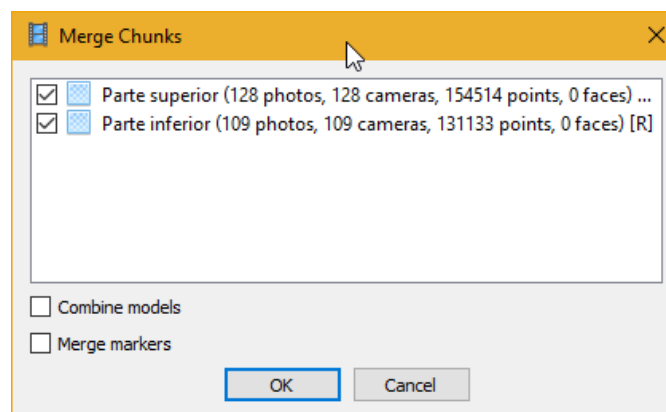


Figura 70: Ventana *Merge chunks*

Aparece la ventana de la Figura 70, donde se seleccionan los *chunks* a combinar, y donde da la opción de combinar también los modelos y los marcadores de estos. Sólo se combinarán aquellos marcadores con el mismo nombre.

En el caso que se estudia en el presente documento, el proceso de combinar los *chunk* “superior” e “inferior” da como resultado la nube de puntos de la Figura 71, de 15.122.615 puntos.

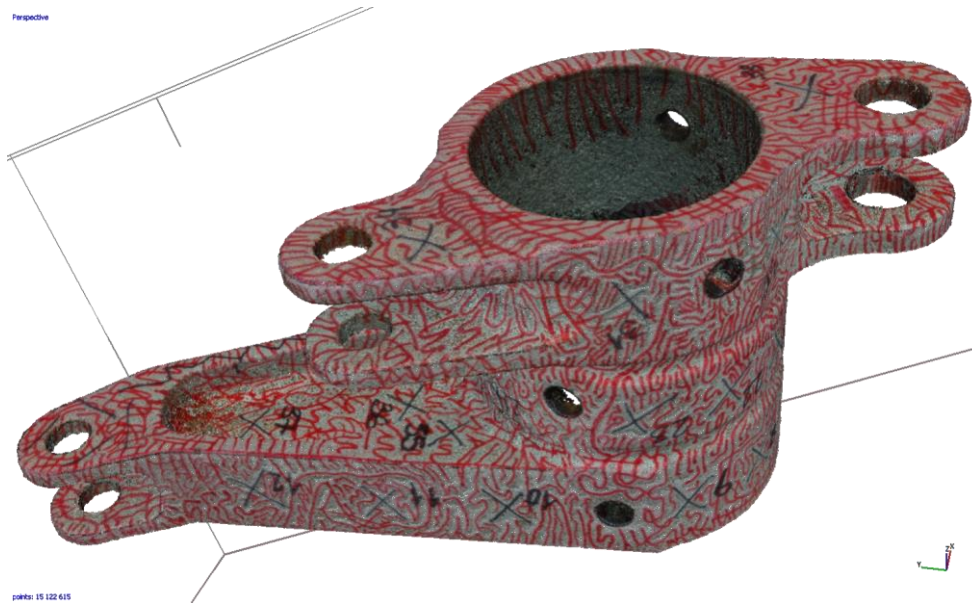


Figura 71: Nube de puntos final

## 4.4 Creación del Mallado

Con la creación del mallado se busca transferir la información que contiene la nube de puntos a un modelo tridimensional basado en polígonos. Para crear el mallado partimos de la nube densa de puntos. Es importante volver a posicionar la caja delimitadora o *Bounding box* como se explica en el punto 2.5. si esta ha sido girada durante el proceso de alineación de los *chunks*.

La opción *Build Mesh...* se encuentra en el menú *Workflow* y, al seleccionarlo, muestra la siguiente ventana:

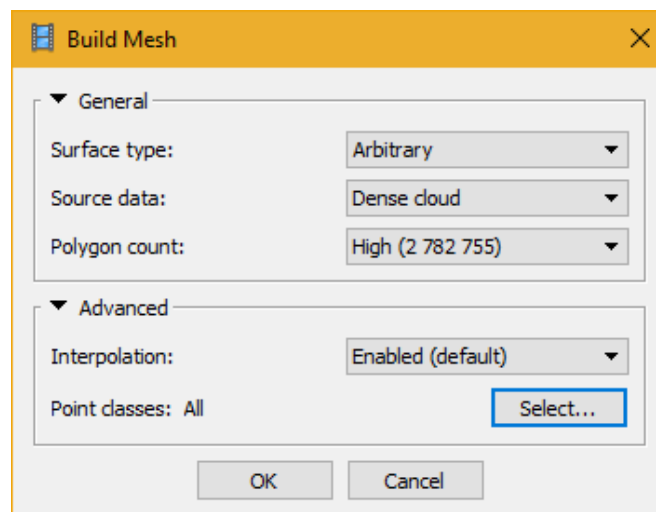


Figura 72: Ventana *Build Mesh*

PhotoScan incorpora varios métodos de reconstrucción del mallado y otros parámetros, entre los cuales encontramos:

- **Surface type:**
  - **Arbitrary:** se usa para modelar cualquier tipo de objeto. Esta opción es recomendable para objetos cerrados, como estatuas, edificios... No tiene en cuenta el tipo mde geometría que se va a reconstruir, lo que se traduce en mayores consumos de memoria.
  - **Height field:** este método está optimizado para la reconstrucción de modelos planos como terrenos o bajo relieves. Es recomendable su uso para procesar tomas aéreas de fotografías, dado que requiere menos memoria y permite un procesado de una mayor cantidad de información.
- **Source data:**
  - Especifica los elementos a partir de los cuales se va a generar el mallado. Se puede seleccionar tanto la nube preliminar, para generar un modelo rápido 3D, o la nube densa, con la que se consiguen resultados de mayor calidad a cambio de un mayor tiempo de procesado.
- **Polygon count:** limita el número máximo de polígonos o caras en el mallado final. Los valores que sugiere el software (*High*, *Medium* y *Low*) se calculan en base a la cantidad de puntos existentes en la nube densa de puntos previamente generada: la proporción es, respectivamente, 1/5, 1/15 y 1/45. Dichos valores corresponden a un número óptimo de polígonos para un mallado con dicho nivel de detalle. De igual manera, el software también permite introducir manualmente este número seleccionando la opción *Custom*, teniendo en cuenta que un número demasiado pequeño produciría un mallado muy burdo, mientras que un número demasiado grande (más de 10 millones) probablemente cause problemas de visualización.

Adicionalmente se encuentran los siguientes parámetros desplegando la pestaña *Advanced*:

- **Interpolation:**
  - Si se dehabilita la interpolación (**Disabled**), se consigue una reconstrucción fiel a la nube densa de puntos, ya que sólo se reconstruyen las zonas de la nube con cierta densidad de puntos. Normalmente se requiere rellenar los distintos agujeros a posteriori manualmente.
  - Si se deja activada (**Enabled (default)**), PhotoScan interpolará algunas superficies dentro de un círculo de cierto radio alrededor de cada punto de la nube densa. Como resultado, algunos agujeros pueden rellenarse automáticamente.
  - El modo **Extrapolated** genera un modelo sin agujeros, lo cual puede generar grandes áreas de geometría adicional, pero que pueden ser eliminadas fácilmente más tarde usando herramientas de selección y de corte.
- **Point classes:** permite seleccionar los tipos de puntos de la nube densa de puntos que se van a utilizar para la construcción del mallado.

Utilizando los parámetros que se muestran en la Figura 72, se consigue la siguiente geometría:



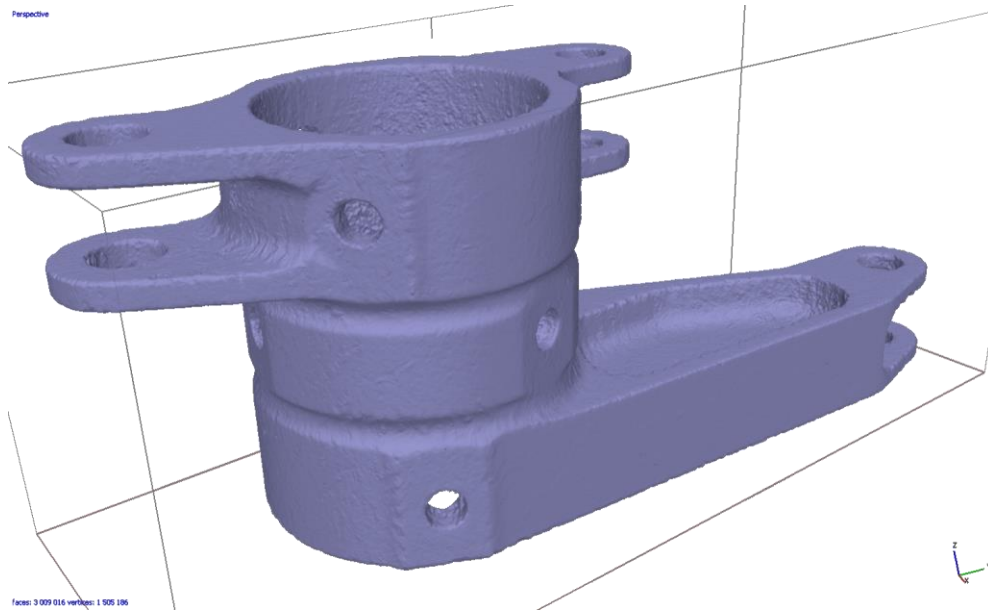


Figura 73: Mallado final

En general, se puede concluir que se ha conseguido una buena representación de la pieza, con una calidad superficial aceptable, aunque, en zonas como el agujero más grande, mostrado en la Figura 74, o en los demás agujeros, donde no se han conseguido grandes densidades de puntos, la calidad de la superficie es menor, llegando a ser inexistente en algunas zonas donde no se han conseguido puntos. Esto se debe probablemente a la configuración de las cámaras, por lo que se podrían mejorar añadiendo fotografías de dichas zonas, hechas con lentes de enfoque corto.

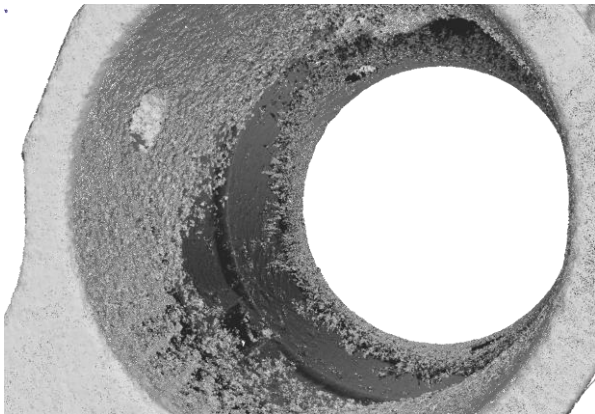


Figura 74: Nube de puntos en el agujero interior

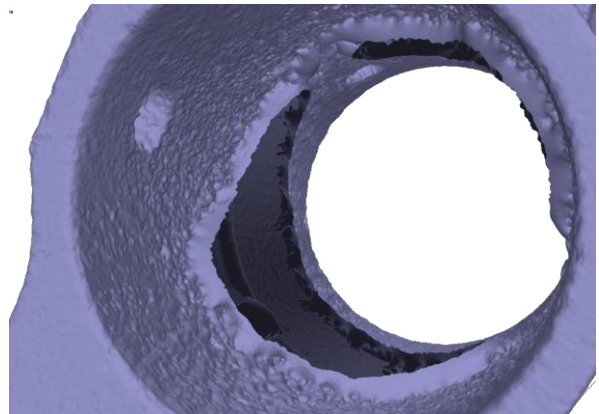


Figura 75: Geometría del agujero interior

## 4.5 Generación de texturas

El texturizado pretende transferir los colores de los píxeles

Para generar texturas para el modelo creado, PhotoScan incorpora una serie de herramientas y parámetros que se pueden encontrar en el menú *WorkFlow* → *Build Texture...*

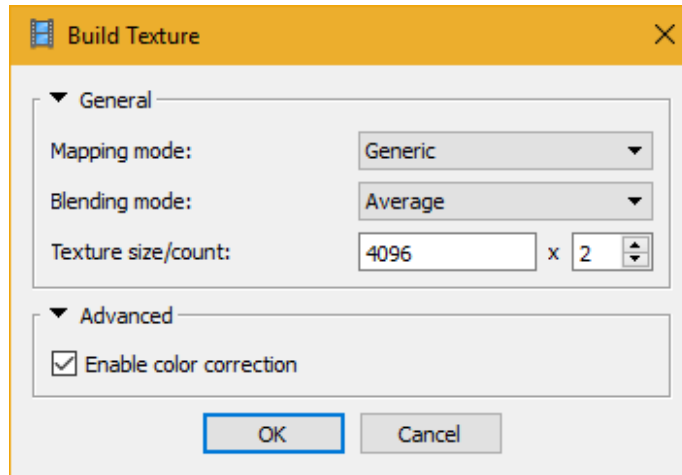


Figura 76: Ventana *Build Texture*

Entre los parámetros que ofrece PhotoScan se pueden encontrar:

- **Mapping mode:** determina cómo se empaquetará la textura del objeto en la lista de texturas.
  - **Generic:** permite mapear texturas para una geometría arbitraria. El software no asume ningún tipo especial de escena e intenta crear una textura uniforme.
  - **Adaptative orthophoto:** la superficie a texturizar se separa entre las regiones planas y las partes verticales. La región plana se texturiza usando proyección ortogonal, mientras que las regiones verticales se texturizan de forma separada para mantener una representación precisa de estas regiones.
  - **Orthophoto:** en este modo toda la superficie se texturiza usando proyección ortogonal.
  - **Spherical:** este modo es recomendable para objetos con forma esférica. Es importante respetar la caja delimitadora del modelo, orientando la cara roja por debajo del modelo, la cual define el eje de la proyección esférica.
  - **Single photo:** genera la textura a partir de una única fotografía. Esta se selecciona desde la lista *Texture from*.
  - **Keep uv:** se usa para reconstruir una textura sin cambiar su parametrización; por ejemplo, utilizar una resolución diferente.
- **Blending mode:** selecciona el modo en que los píxeles de diferentes imágenes se combinan en la textura final.
  - **Mosaic:** da mejores resultados en los modos de mapeo ortogonales, ya que no mezcla píxeles de fotografías superpuestas, si no que prioriza los píxeles que se encuentran más cerca del centro de la imagen en cuestión.
  - **Average:** usa el valor medio de los píxeles entre las fotos que se superponen.
  - **Max Intensity:** selecciona la foto con una mayor intensidad en el píxel en cuestión.
  - **Min Intensity:** selecciona la foto con una menor intensidad en el píxel en cuestión.
- **Texture size / count:** especifica el tamaño de la textura en píxeles y el número de archivos en la que se va a exportar la textura. Exportar la textura en varios archivos resulta en una mayor resolución de la textura final del modelo, mientras que exportar una textura de alta resolución a un único archivo puede provocar limitaciones de RAM.
- **Enable color correction:** esta opción es útil si las fotos presentan una gran variabilidad en el brillo.

Con las opciones de Figura 76, se obtienen los siguientes resultados:

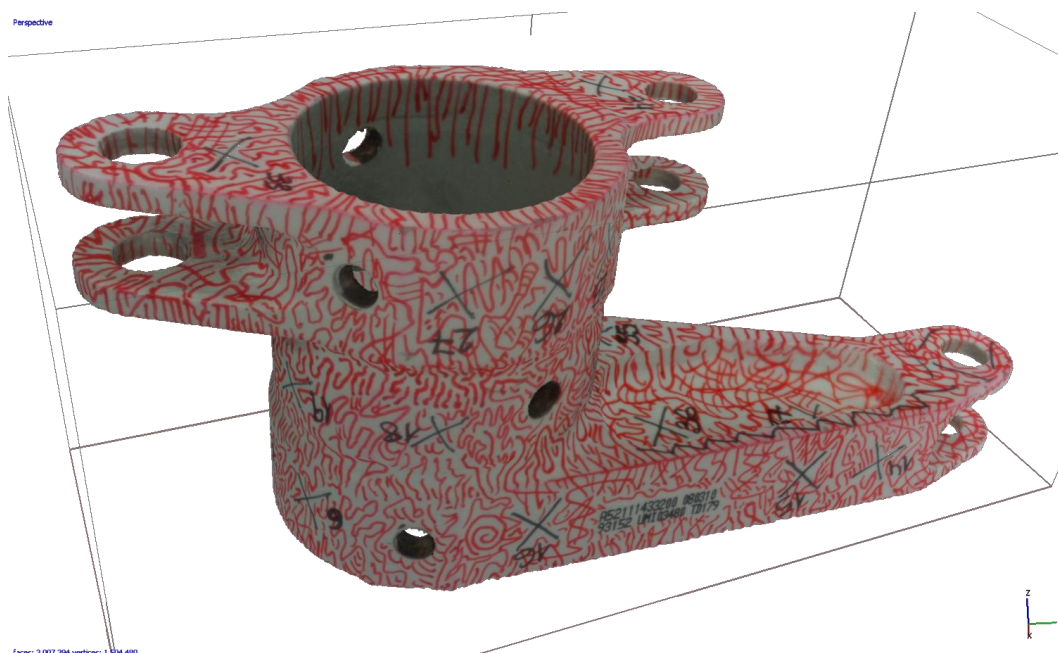


Figura 77: Modelo final texturizado

## 4.6 Exportación del modelo

Tras concluir el proceso de digitalización del modelo en cuestión, con frecuencia se pretende, o se requiere, tener acceso a la geometría generada en otro software ajeno a PhotoScan, ya sea para realizar un tratamiento postproceso, para integrarlo en otro conjunto geométrico o simplemente para facilitar su visualización. Existen multitud de extensiones de archivos con contenido geométrico en el mercado. PhotoScan permite la exportación a algunos de los más comunes. Para exportar un conjunto geométrico desde PhotoScan, es necesario contar con un chunk que contenga de modelo geométrico. Tras localizar el modelo en cuestión en la ventana *Workspace*, se hace click derecho sobre el nombre del modelo (ver Figura 78) y se selecciona la opción *Export Model...*

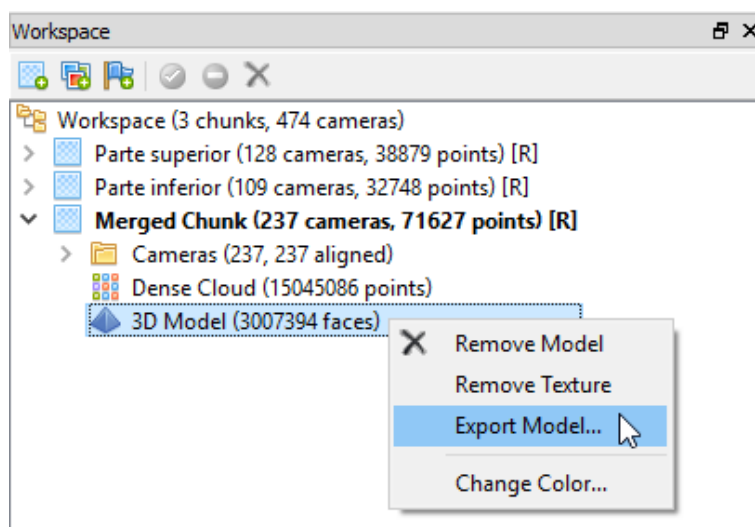


Figura 78: Opción exportar modelo

Aparece la ya conocida ventana con el explorador de archivos de Windows. Tras escribir un nombre para el archivo, esta versión de PhotoScan permite exportarlo como Wavefront OBJ (.obj), 3DS model (.3ds), Stanford PLY (.ply) o autodesk DXF (.dxf), entre otros.



## 5 RESULTADOS

En este capítulo se recogen los diferentes resultados obtenidos de la digitalización conseguida de los diferentes modelos, utilizando tanto las técnicas basadas en láser presentadas en el capítulo 3 como el proceso SMF de fotogrametría usando PhotoScan, de las diferentes piezas que se han mostrado en el capítulo 2, con el objetivo de tener en una misma sección todos ellos, para así poder tener un esbozo de lo que pueden conseguir estas técnicas.

Para la visualización de la geometría en formato .igs y .stl proporcionada por el escáner FARO se ha utilizado el software AutoCAD 2018 y su comando *IMPORTAR* y el software Autodesk Fusion 360 y su función *Import Mesh*.

A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos en la práctica.

### 5.1 Pieza 1

Para la pieza 1, cuyo modelo se ha utilizado en el capítulo 4 para desarrollar el proceso completo de digitalización en PhotoScan, se han obtenido los resultados que se presentan a continuación.

#### 5.1.1 SfM: Agisoft PhotoScan

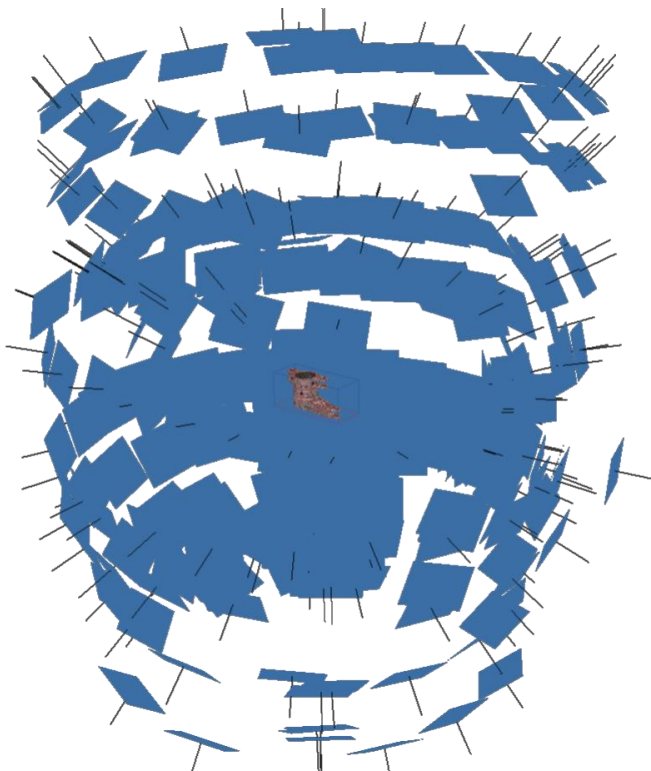


Figura 79: Fotografías en la pieza 1 (237 en total)



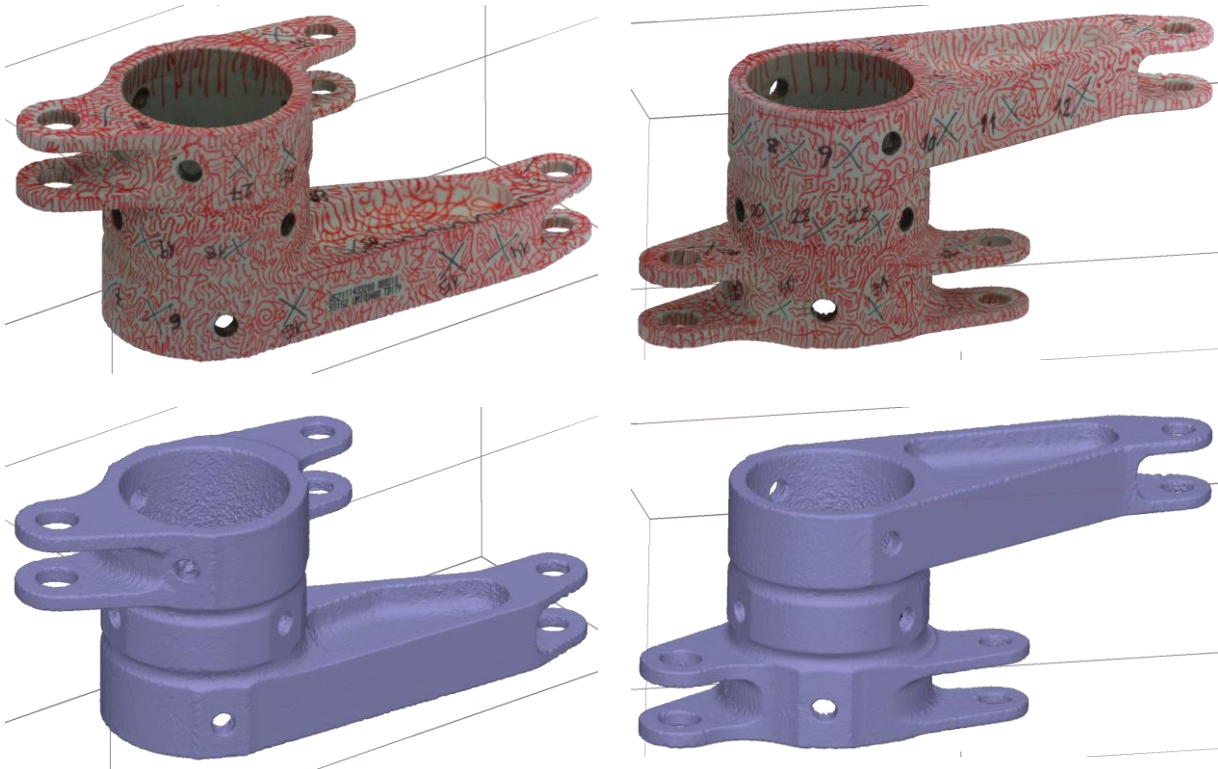


Figura 80: Modelo con y sin textura de la pieza 1

En el caso de la pieza 1, se obtiene un modelo bastante fiel a la pieza original. Se ha conseguido una calidad superficial considerable gracias al hecho de haber llenado la pieza de marcas con marcadores de colores, aunque esto también hace que la geometría de las superficies se vea influenciada por estas marcas y que se obtenga una textura final que no es la original de la pieza. En las aristas se pueden observar abultamientos no encontrados en la pieza, que se acentúan en comparación con los encontrados en las superficies. En cuanto a los orificios, el principal y mayor va aumentando los abombamientos en su superficie según se adentra en el modelo (esto es debido al conjunto de fotografías utilizado y la sombra que la propia pieza se hace en estas). Los demás orificios se han conseguido reflejar en el modelo tras una limpieza posterior de la nube de puntos, sabiendo que dichos agujeros no contienen puntos.

### 5.1.2 Escáner láser fijo

Los resultados de los 8 diferentes escaneos son nubes de puntos que se combinan utilizando el software CloudCompare. Una vez combinadas se pueden separar los diferentes modelos desde el mismo software. Para generar el mallado se puede utilizar el software MeshLab, aunque con estas nubes ha resultado imposible generar un mallado lo suficientemente bueno, probablemente debido a la poca densidad de puntos de las nubes.

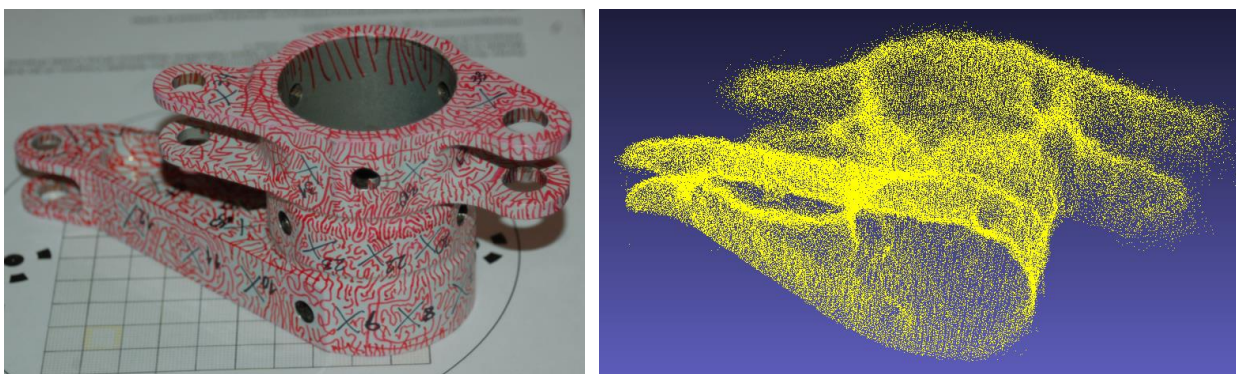


Figura 81: Pieza a escanear (izquierda) y nube de puntos (derecha)

## 5.2 Pieza 2

### 5.2.1 SfM: Agisoft PhotoScan

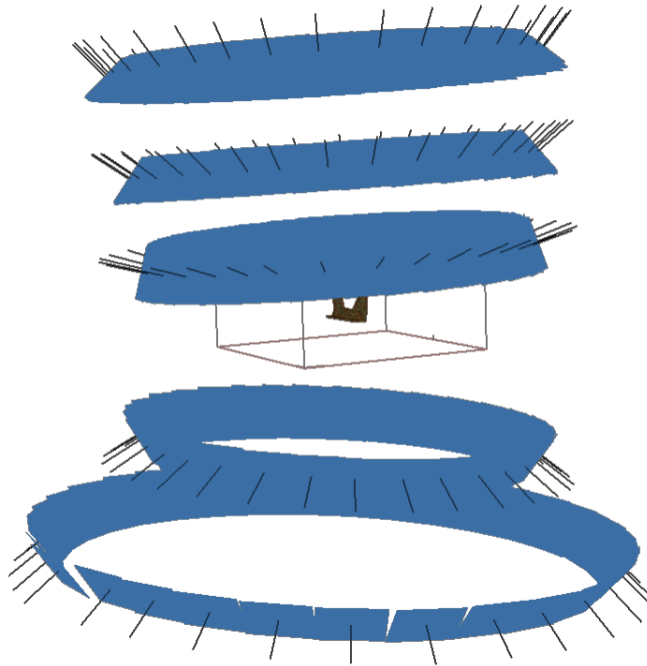


Figura 82: Fotografías en la pieza 2 (161 en total)

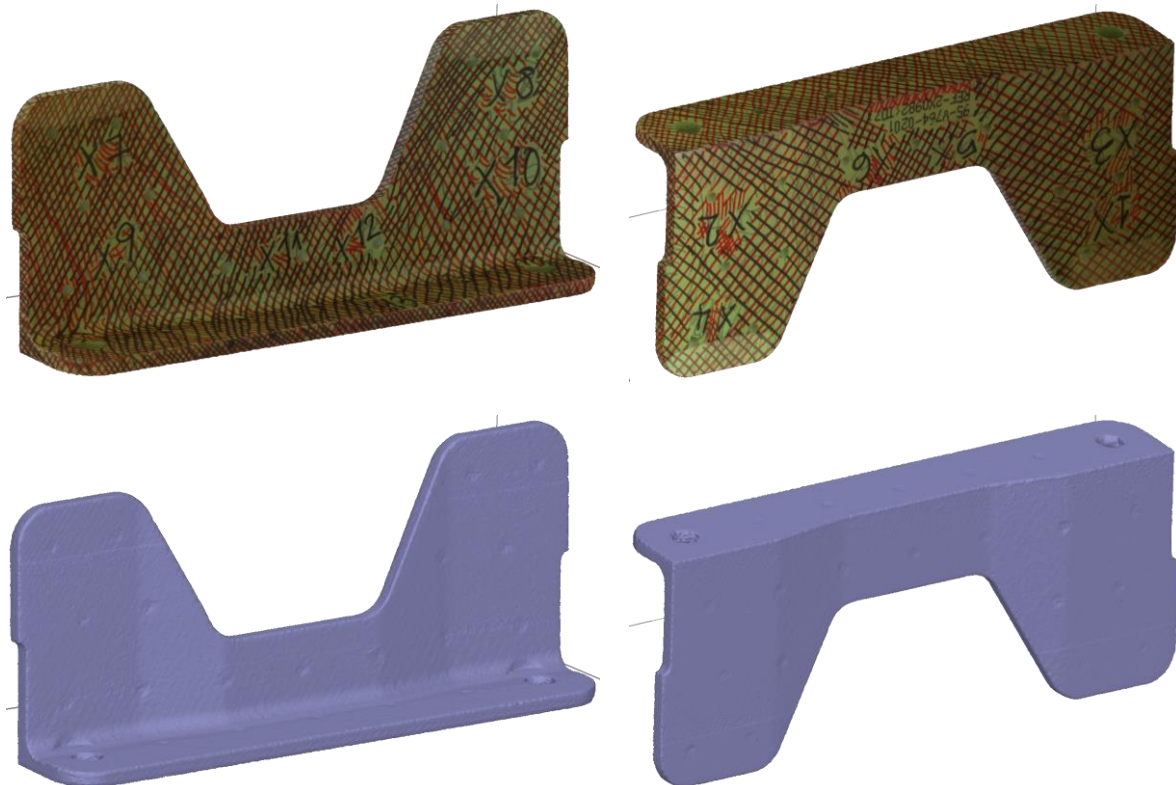


Figura 83: Modelo con y sin textura de la pieza 2

Sobre la pieza 2 se puede decir que se ha conseguido una calidad superficial mayor que en la primera. Esto puede haberse debido a hecho de usar una configuración media en la cantidad de polígonos para la construcción del

mallado, frente al mallado de alta densidad utilizado en el primero. Las aristas conseguidas también representan de forma más fiel a la pieza real. En este caso, sólo los dos agujeros de la base han sido limpiados en la nube de puntos, mientras que los más pequeños se han dejado llenos de puntos escoria. Esto ha resultado en una superficie con ligeros hundimientos allí donde se debían encontrar estos pequeños agujeros.

### 5.2.2 Escáner láser fijo

De nuevo, al igual que pasa con la pieza 1, debido a la poca densidad de puntos de las nubes, no se puede conseguir una superficie que represente la geometría de la pieza.

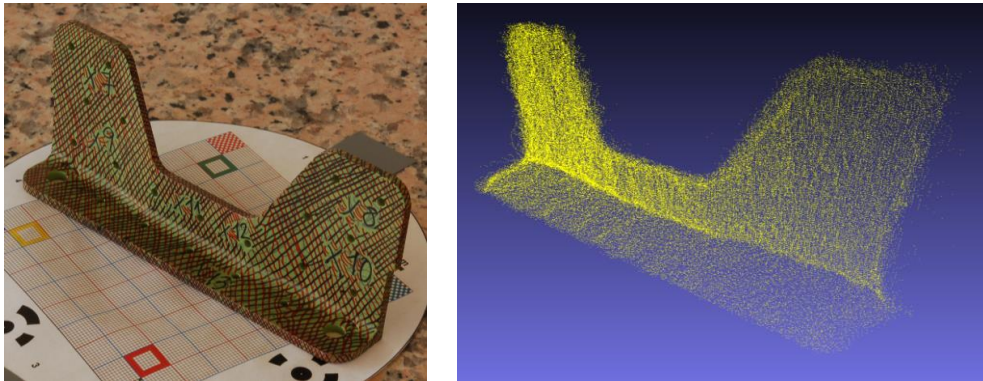


Figura 84: Pieza a escanear (izquierda) y nube de puntos (derecha)

### 5.2.3 Escáner láser con brazo articulado

Para este modelo se han usado dos composiciones complementarias de la pieza para obtener un modelo completo de esta, como se comentaba en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Con esta técnica se consigue un modelo de gran precisión de la pieza. Las condiciones superficiales obtenidas son las de mayor calidad entre las técnicas usada, librándose de las imperfecciones encontradas en el caso de la recreación fotogramétrica, que eran causadas por el uso de los rotuladores de colores.

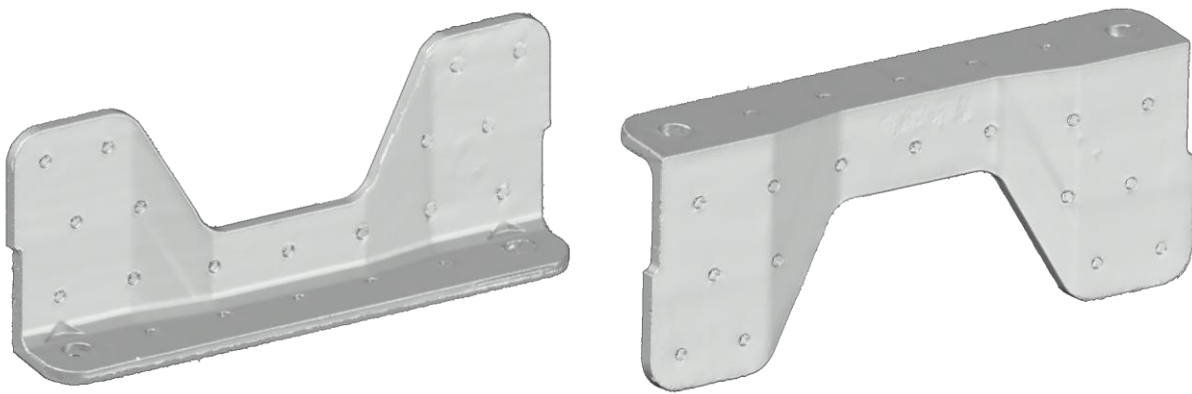


Figura 85: Modelo de la pieza 2

En este caso, sí que se consiguen captar con facilidad y buenos resultados los agujeros que presenta la pieza, pudiendo incluso realizar medidas en estos. Esto se puede comprobar en la siguiente figura.



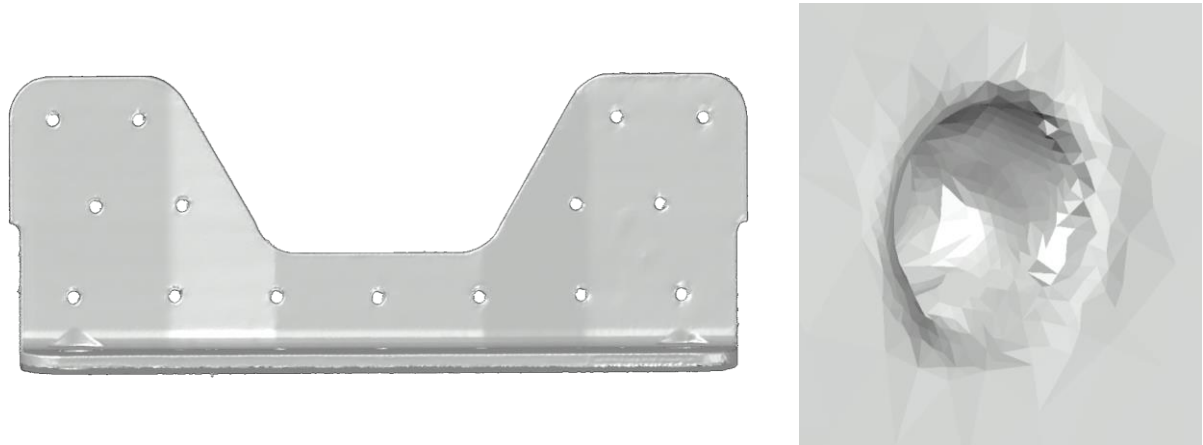


Figura 86: Detalle de los agujeros de la pieza 2

### 5.3 Pieza 3

#### 5.3.1 SfM: Agisoft PhotoScan

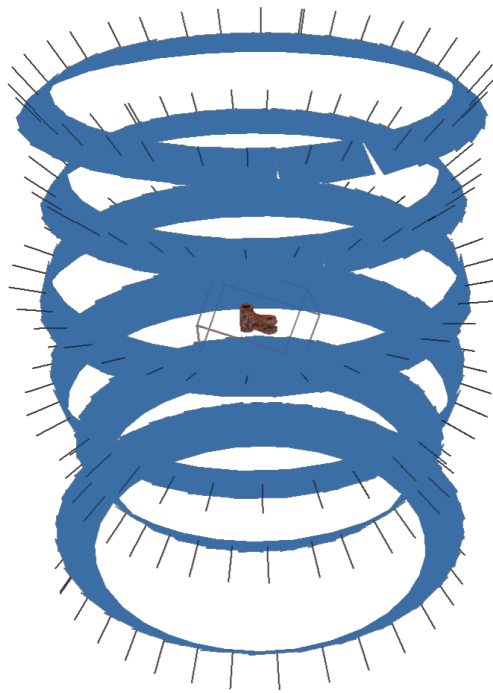


Figura 87: Fotografías en la pieza 2 (161 en total)

En la última de las piezas tratadas se consiguen los mejores resultados hasta ahora. La calidad superficial y de las aristas es incluso mayor que en la pieza 2, y los orificios principales se han conseguido que queden representados con una mínima limpieza de la nube de puntos densa. Incluso se han conseguido buenos resultados en la zona interna de la muesca que presenta la pieza, que normalmente queda en sombra. Esto puede haberse debido a la iluminación utilizada en la toma de fotos de esta pieza, al haberse realizado con luz natural al atardecer que, en este caso, conseguía un menor impacto en las zonas que quedaban en la sombra de la luz. Ocurre el caso contrario con el primer modelo, donde se utiliza el flash que incorpora la cámara, que hace que se pierda parte de información en las sombras. En esta tercera pieza, al igual que en la segunda, se utiliza un mallado de densidad media de polígonos, frente al mallado de alta densidad de la primera pieza.

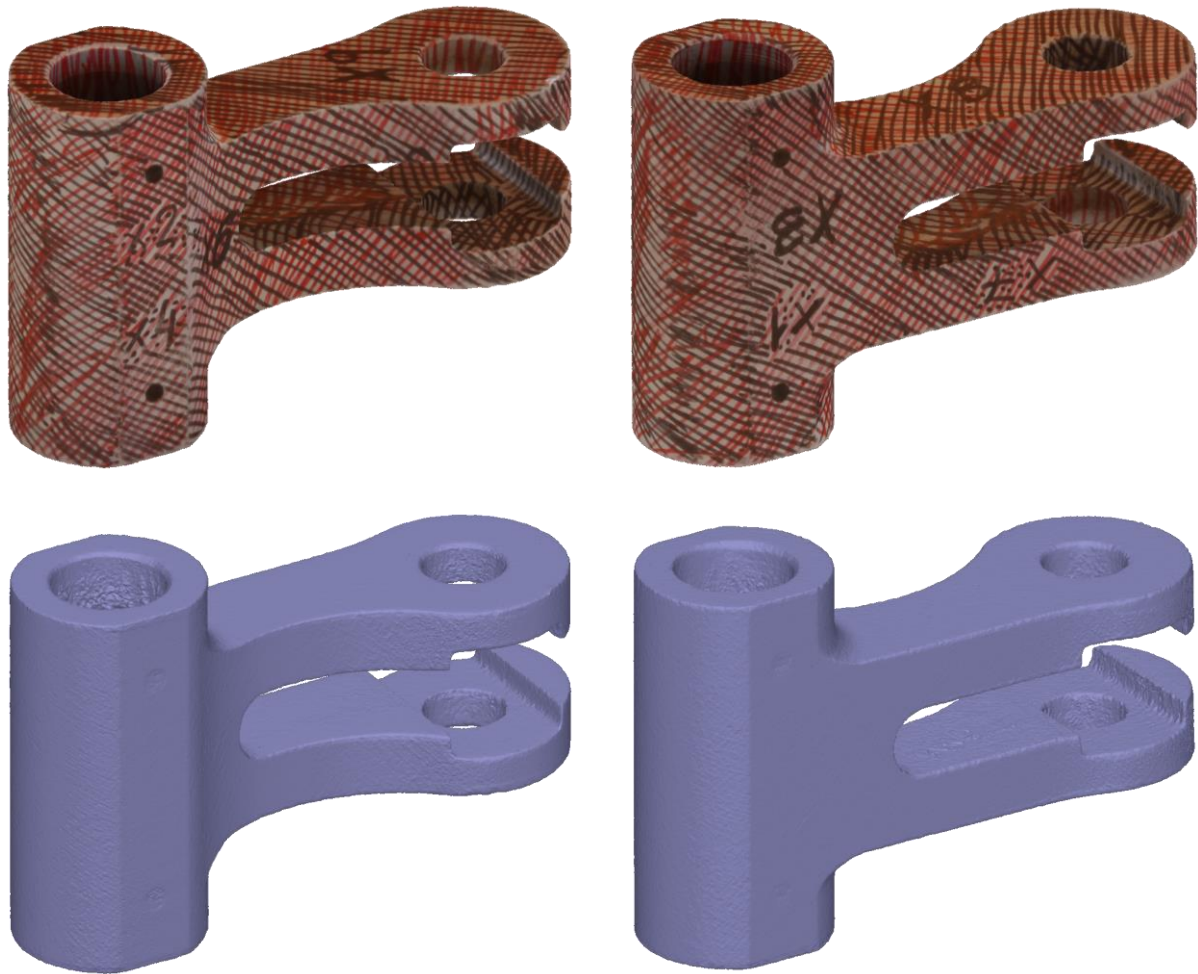


Figura 88: Modelo con y sin textura de la pieza 3

### 5.3.2 Escáner láser con brazo articulado

Como se puede observar en la imagen derecha de la Figura 85, falta parte de la geometría de la pieza en el modelo. Esto es así debido a que se realiza el escaneado de sólo una composición de la pieza, la cual corresponde a que dicha pieza se deje asentar sobre una superficie plana, correspondiente a dicha zona.

En cuanto a los resultados de este modelo, se puede volver a decir, como se hizo con la pieza 2, que la calidad superficial es más homogénea y fiel al modelo real.

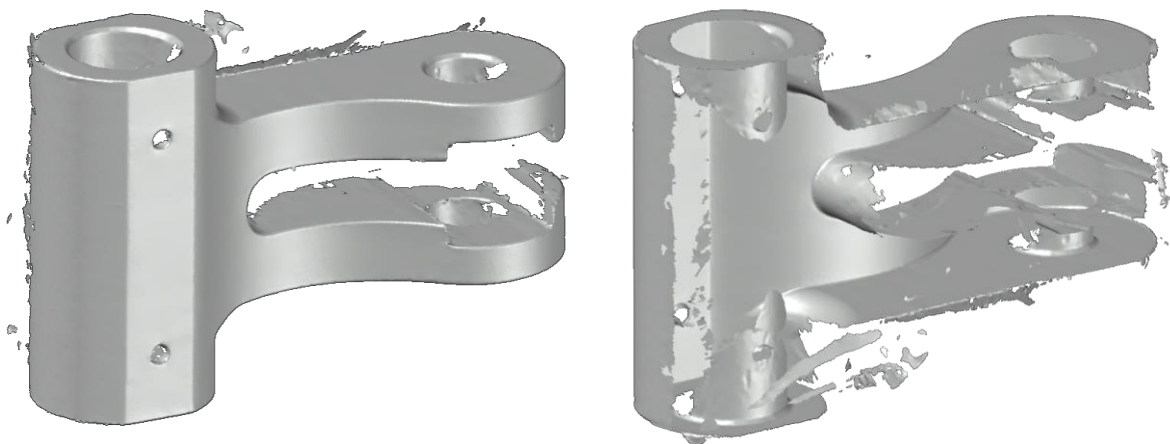


Figura 89: Modelo de la pieza 3

## 6 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos, se ha decidido examinar los modelos en el software CATIA V5 de Dassault Systèmes, que permite obtener un estudio inercial y másico de los mismos. Para esto, es necesario que los modelos no queden en un mallado superficial formado por polígonos, sino que se traten de entidades tridimensionales con cuerpo sólido, es decir, con un contenido interno que permita medir estas propiedades.

Se ha decidido utilizar el software Autodesk Fusion 360 para trabajar con los mallados, ya que este incorpora herramientas para cerrar mallados y modificar en cierto grado su geometría. Fusion 360 permite además importar fácilmente mallados a su entorno de trabajo en formato .stl.

Tras la solidificación de piezas, se realizará una comparativa en CATIA V5.

### 6.1 Mallado de piezas

#### 6.1.1 Pieza 3: mallado desde láser FARO

El escáner láser FARO proporciona la pieza en formato .igs. Con el objetivo de conseguir refinar la geometría conseguida por el escáner láser desde Fusion 360, se transforma dicho archivo a formato .stl utilizando el software CAD Exchanger.

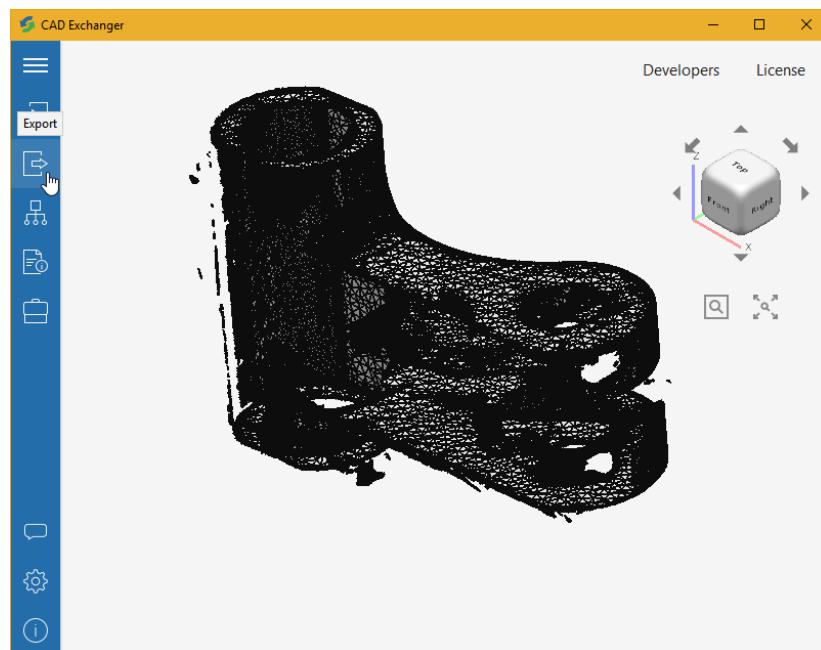


Figura 90: Entorno de CAD Exchanger

Una vez transformado, desde Fusion 360 se importa el mallado en formato .stl. Para ello, se crea un componente nuevo en el árbol de trabajo desde el menú *Create* y se añade la geometría usando el menú *Insert*.

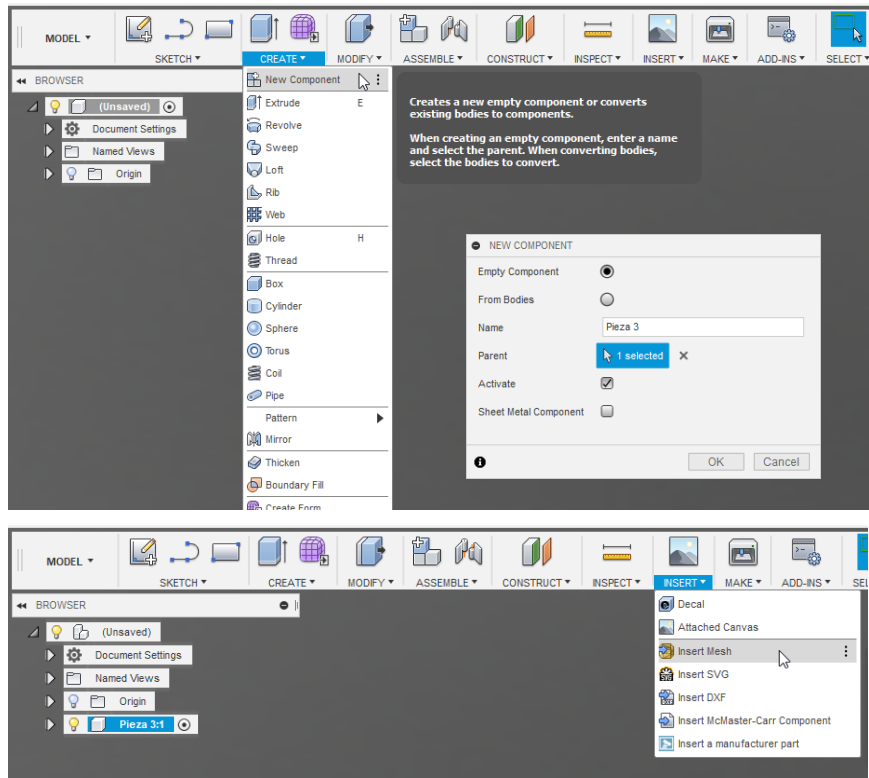


Figura 91: Inserción del mallado como nuevo componente *body*

Tras esto, aparecerá el mallado de la pieza para colocarlo en el espacio tridimensional. Utilizando los botones que aparecen sobre la pieza, se coloca y se orienta como se crea oportuno.

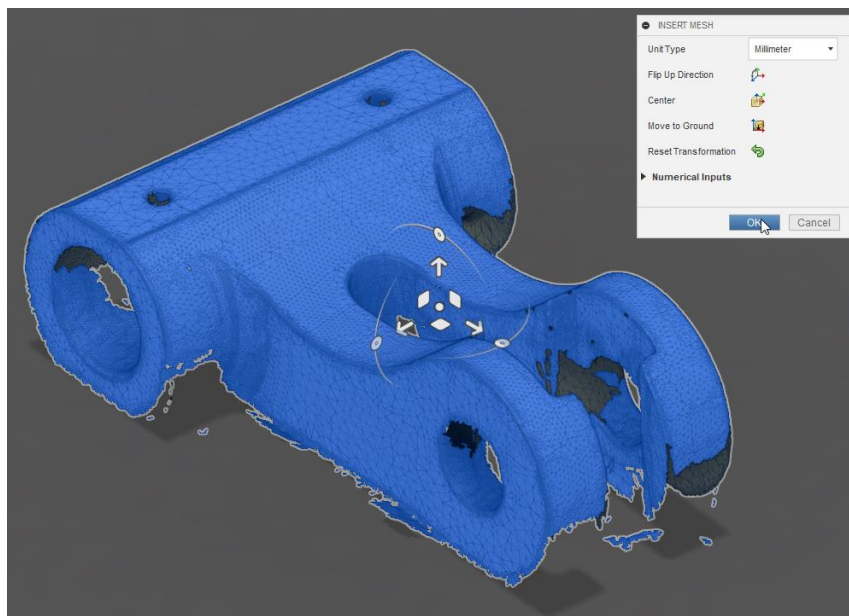


Figura 92: Situación del mallado en el entorno de Fusion360

A continuación se procede a trabajar sobre el mallado en sí. Haciendo click derecho sobre la malla que se desea editar, se selecciona la opción *Edit* para entrar al módulo de edición de mallas.

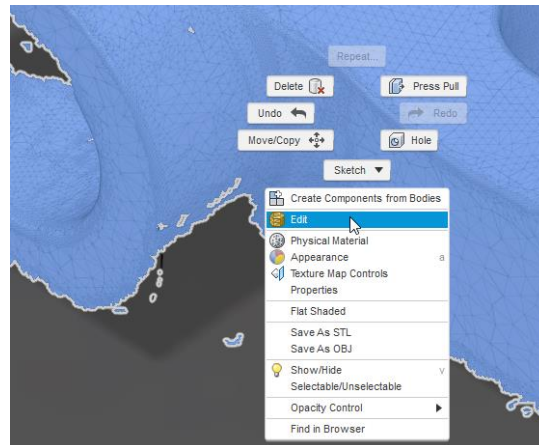


Figura 93: Opción *Edit* del menú desplegable con click derecho

Utilizando las diferentes opciones de selección de polígonos que ofrece el software, se comienza limpiando la geometría no deseada que contiene el mallado, pero no forma parte de la pieza.

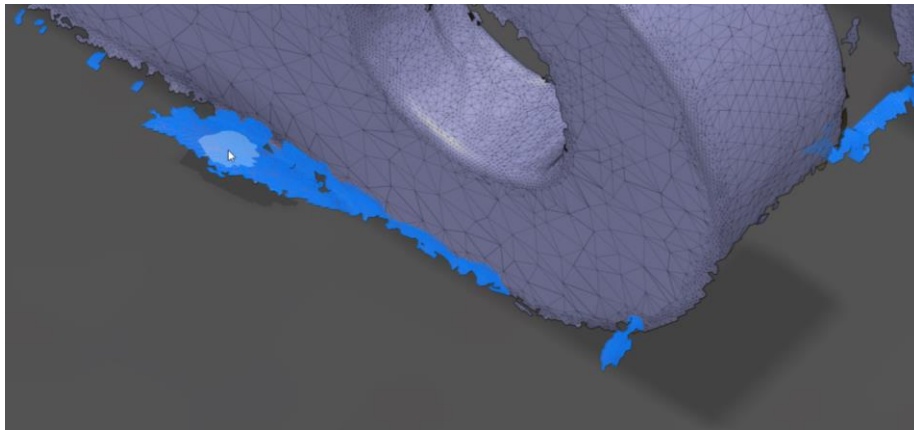


Figura 94: Limpieza del mallado

Con la geometría ya filtrada, se pasa a cerrar la superficie del modelo, con el objetivo final de conseguir un modelo digital sólido. Fusion 360 incorpora una herramienta para esta tarea, situada en el menú *Modify*:

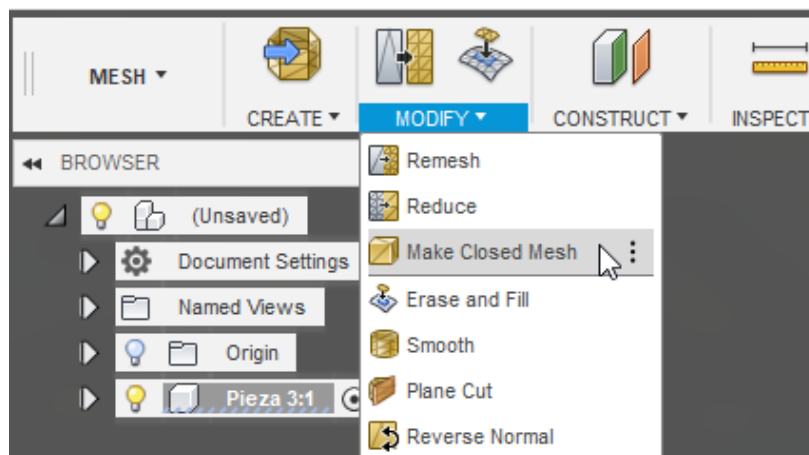


Figura 95: Herramienta *Make Closed Mesh*



Aparece la ventana de parámetros de la herramienta, que permite modificar la densidad de polígonos y el modo de reconstrucción del mallado. En este tipo de piezas, el modo *Preserve Sharp Edges* ha sido el que ha originado los mejores resultados.

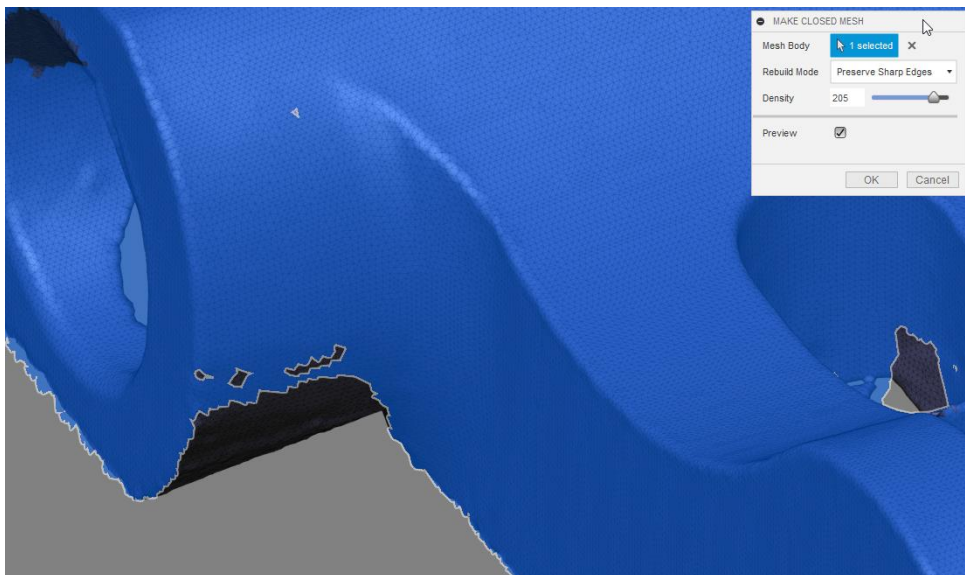


Figura 96: Parámetros de la herramienta de cerrado de mallados

Cuando el proceso se completa, se tiene un modelo mallado completamente cerrado. Tras esto, sería necesario darle escala al modelo, sin embargo, no es necesario ya que el escáner FARO proporciona directamente un modelo a escala real. Con el mallado cerrado y escalado, ya se puede exportar como formato .stl para trabajar con él en el entorno de CATIA.

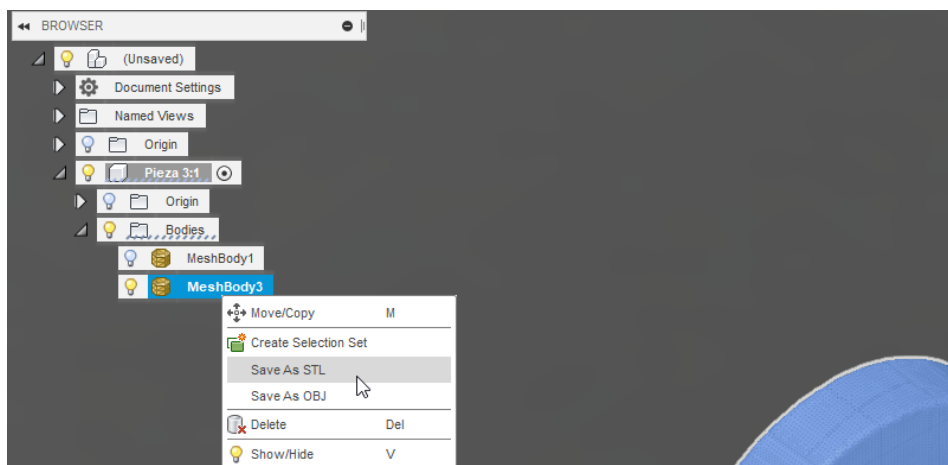


Figura 97: Importación del mallado como archivo .stl

Una vez en CATIA, es necesario comenzar importando el mallado. Desde el módulo *Assembly Design*, este se añade como componente a la composición desde el menú *Product Structure Tools*.

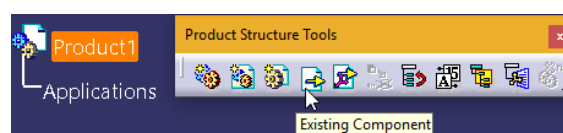


Figura 98: Importación del mallado en el entorno de CATIA

Tras añadir la geometría al *Product 1*, se cambia al módulo *DMU Optimizer* del grupo *Digital Mockup*

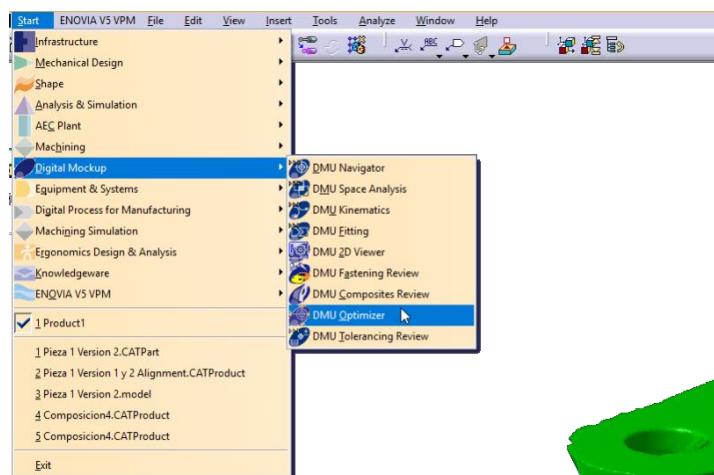


Figura 99: Módulo *DMU Optimizer*

La herramienta *Offset*, destacada con un círculo en la siguiente figura, permite crear un conjunto geométrico de superficies con el formato de trabajo de CATIA a partir del mallado importado.



Figura 100: Herramienta *Offset*

Se selecciona el mallado y se guarda con extensión *.model*:

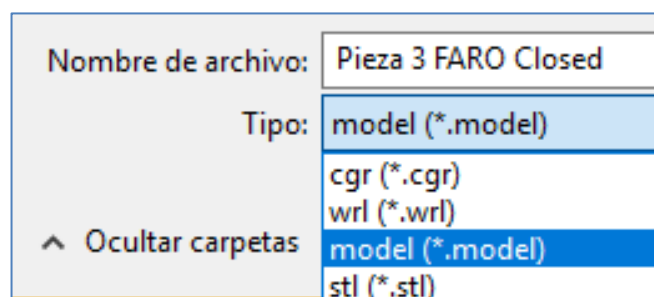
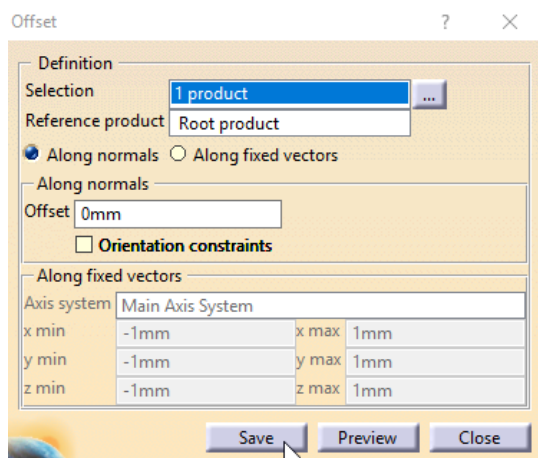


Figura 101: Herramienta *Offset* y ventana de guardado de la geometría resultante

Tras esto se abre el archivo recién guardado (*File* → *Open*) y se copia el árbol *MASTER* del archivo *.model*. Con esto, se abre un nuevo archivo *CatPart* (*File* → *New* → *Part*) y se pega en él el contenido del archivo *.model* que se acaba de copiar:

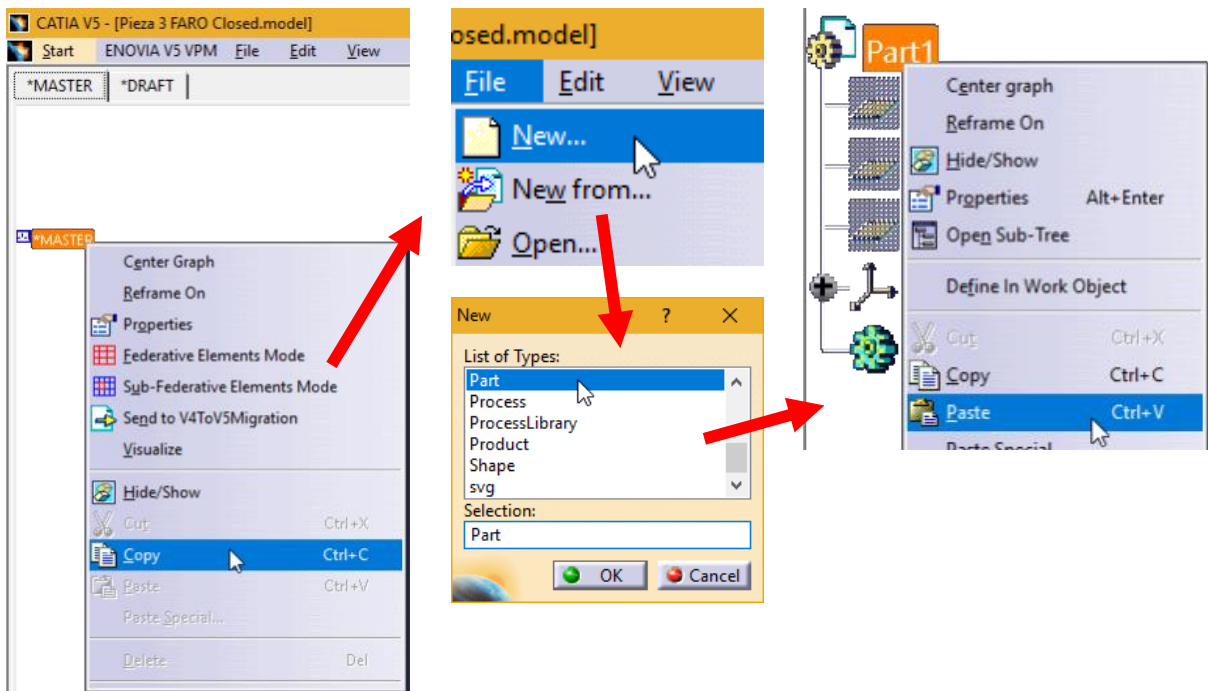


Figura 102: Copia del *MASTER* a un nuevo *CatPart*

Cuando se completa el proceso, el mallado aparece en el árbol de CATIA como un conjunto de superficies sin unir. El siguiente paso es, por tanto, “coser” dichas superficies en una sola entidad. Esto se consigue usando la herramienta *Join* del módulo *Generative Shape Design*. Dentro de la operación, se selecciona el *Geometrical Set* y se inicia el proceso, que puede tardar varios minutos.

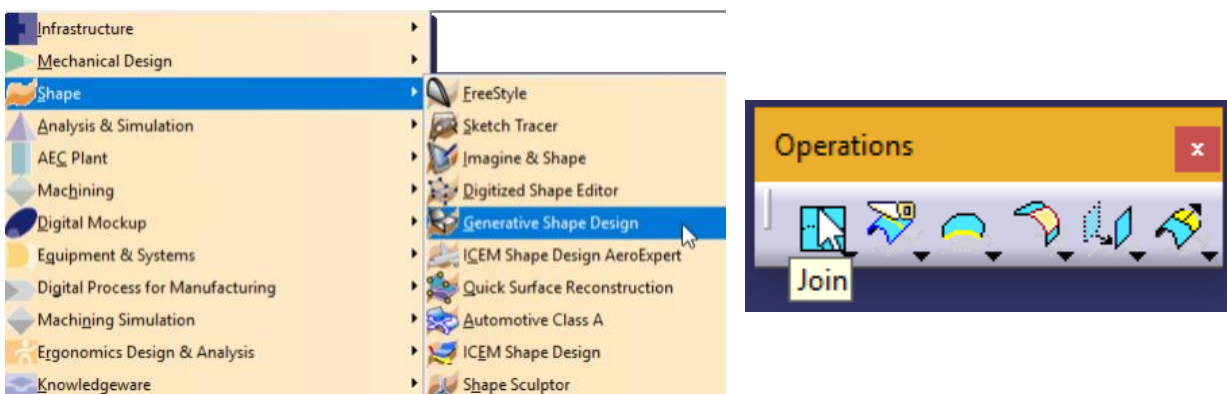


Figura 103: Módulo *Generative Shape Design* (izda.) y herramienta *Join* (dcha.)

Si aparece el siguiente error, puede ser debido a que el mallado consta de varios dominios geométricos. Si algunos de estos dominios son erróneos es necesario eliminarlos desde Fusion 360 y volver a realizar el procedimiento de importación a CATIA. Afortunadamente, CATIA ofrece una visualización de dónde se encuentran dichos errores de cohesión, por lo que pueden ser fácilmente identificados y corregidos.



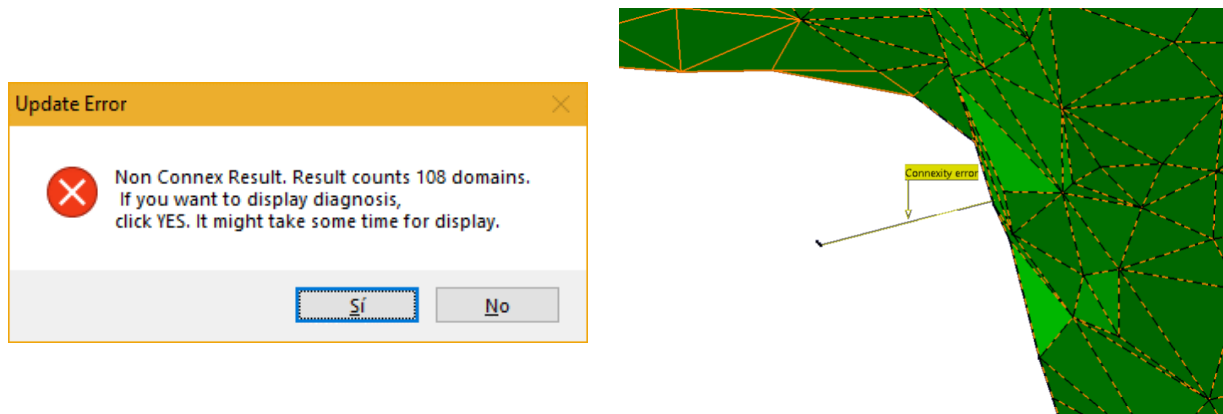


Figura 104: Error de cohesión en el mallado y localización de dominios inconexos

Una vez se tenga el mallado completo ya cerrado y unido en CATIA se puede proceder a solidificar el espacio que este encierra. La herramienta que lleva a cabo esta operación se denomina *Close Surface* del grupo *Surface-Based Features* y se encuentra en el módulo *Part Design*, dentro del grupo *Mechanical Design*.

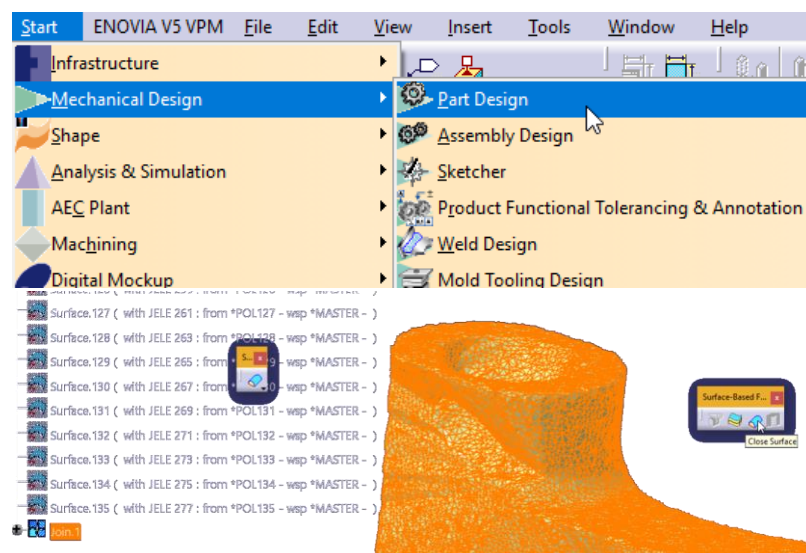


Figura 105: Herramienta *Close Surface*

Sólo queda ocultar las superficies agrupadas en el elemento *Join 1* para descubrir el conjunto solidificado:

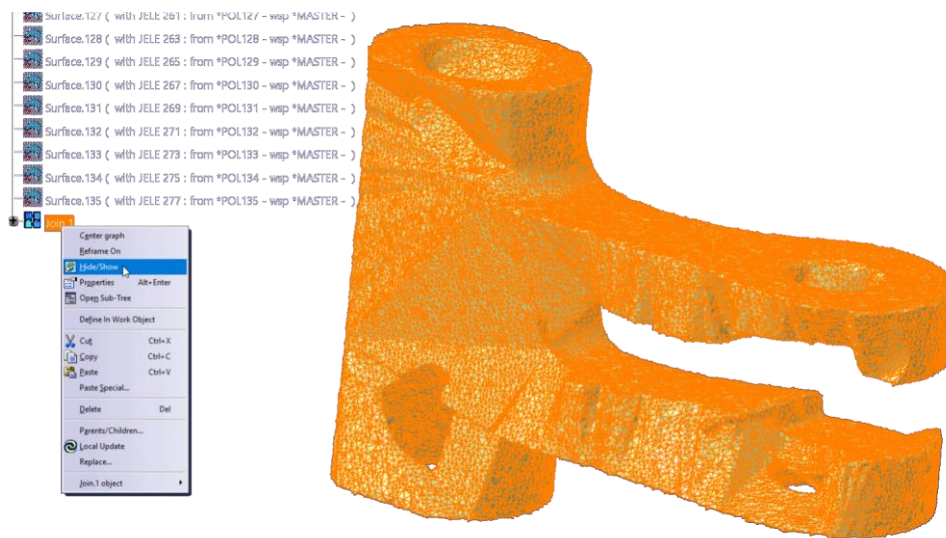


Figura 106: Se ocultan las superficies en *Join 1* para mostrar el modelo sólido

Se puede comprobar que la pieza ha quedado solidificada haciendo un estudio de su sección:

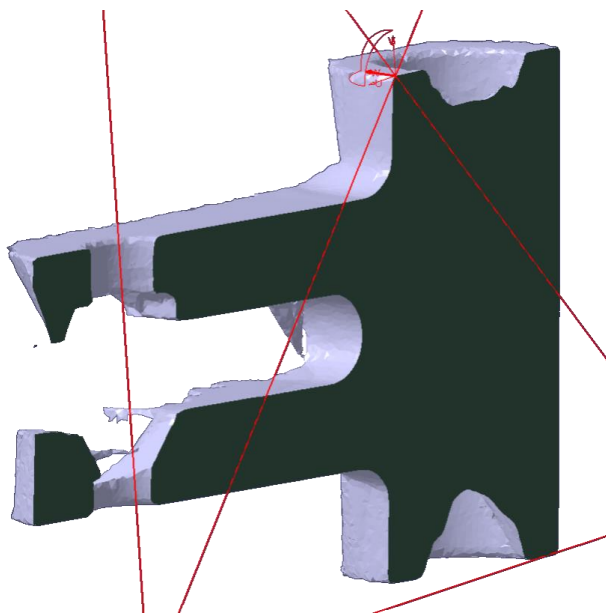


Figura 107: Sección de la pieza en CATIA

### 6.1.2 Pieza 2: PhotoScan

Los mallados que proporciona el software PhotoScan pueden ser exportados con formato .obj como se explica en el apartado 4.6. de este documento. Dicho formato es especialmente útil para trabajar con Fusion 360, pues permite importar fácilmente este tipo de mallados.

En el caso de los modelos obtenidos por fotogrametría, es necesario darles escala en algún punto del proceso. En este caso, se va a utilizar también Fusion 360 convenientemente.

En primer lugar, desde Fusion 360 se importa el mallado en formato .obj que se obtiene desde PhotoScan. Para ello, se crea un componente nuevo en el árbol de trabajo desde el menú *Create* y se añade la geometría usando el menú *Insert*.

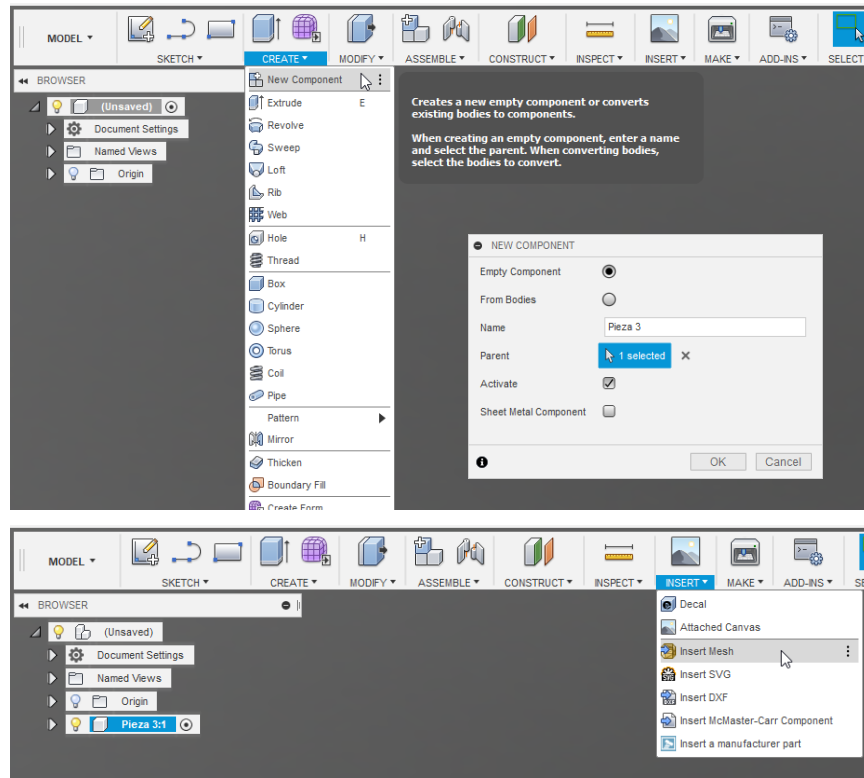


Figura 108: Inserción del mallado como nuevo componente *body*

Tras esto, aparecerá el mallado de la pieza para colocarlo en el espacio tridimensional. Utilizando los botones que aparecen sobre la pieza, se coloca y se orienta como se crea oportuno.

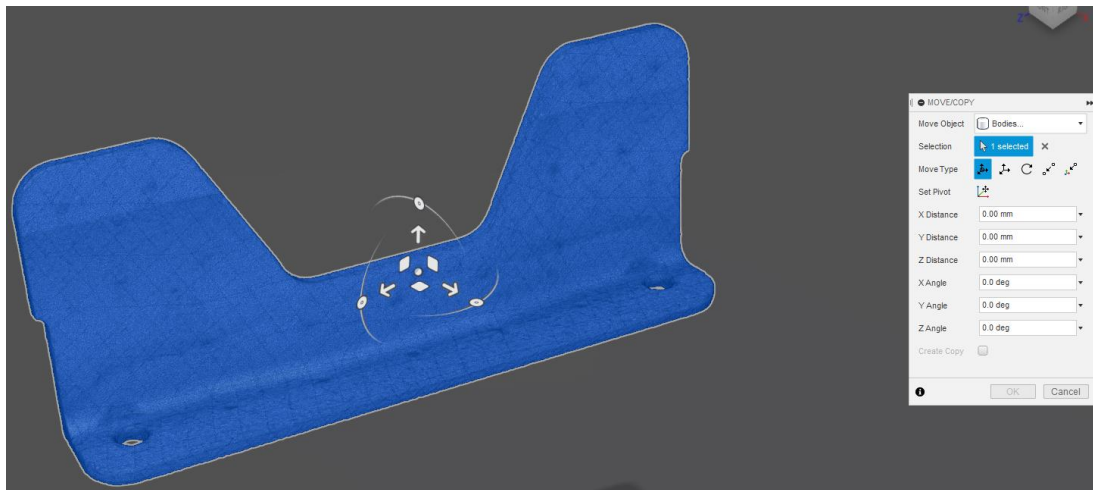


Figura 109: Situación del mallado en el entorno de Fusion360

A continuación, se procede a trabajar sobre el mallado en sí. Haciendo click derecho sobre la malla que se desea editar, se selecciona la opción *Edit* para entrar al módulo de edición de mallas.

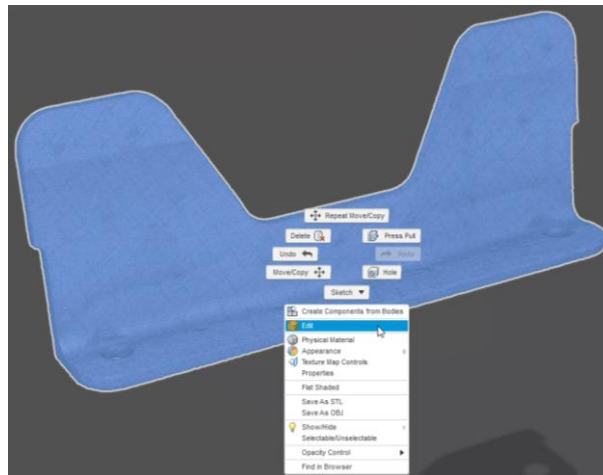


Figura 110: Opción *Edit* del menú desplegable con click derecho

En este punto se pasa a cerrar la superficie del modelo, con el objetivo final de conseguir un modelo digital sólido. Fusion 360 incorpora una herramienta para esta tarea, situada en el menú *Modify*:

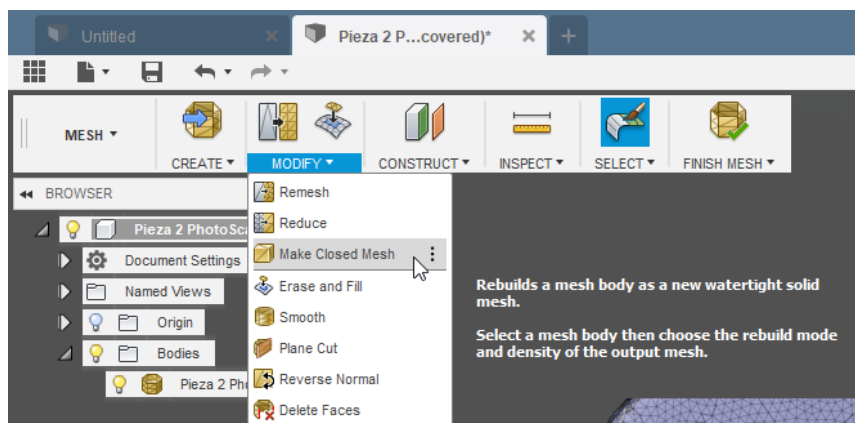


Figura 111: Herramienta *Make Closed Mesh*

Aparece la ventana de parámetros de la herramienta, que permite modificar la densidad de polígonos y el modo de reconstrucción del mallado.

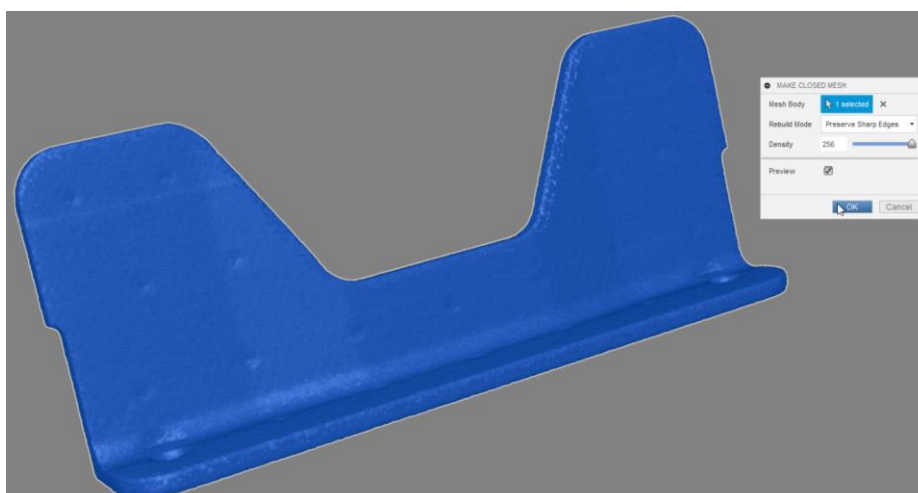


Figura 112: Parámetros de la herramienta de cerrado de mallados

Cuando el proceso se completa, se tiene un modelo mallado completamente cerrado. Sin embargo, los mallados que se han conseguido en PhotoScan están compuestos por una cantidad demasiado elevada de polígonos, por lo que resulta complejo trabajar con estos mallados. Fusion 360 también incorpora herramientas para lidiar con este problema: *Reduce* y *Remesh*. En este caso, se utiliza la operación *Remesh* para replantear el mallado y hacerlo más manejable.

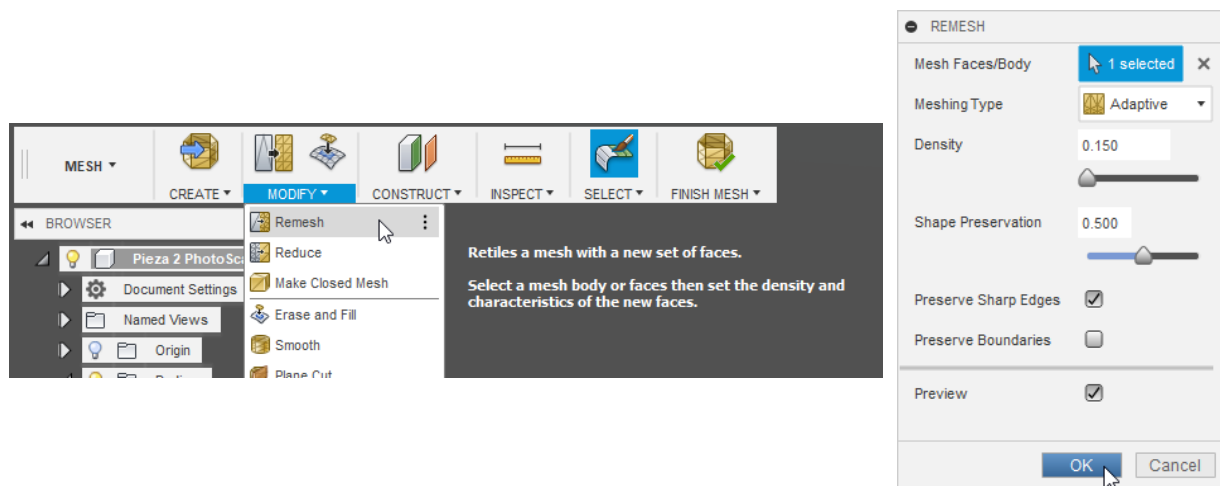


Figura 113: Herramienta *Remesh* (izda.) y parámetros (dcha.)

En las siguientes imágenes se puede observar cómo se ha reducido la densidad de polígonos del modelo:

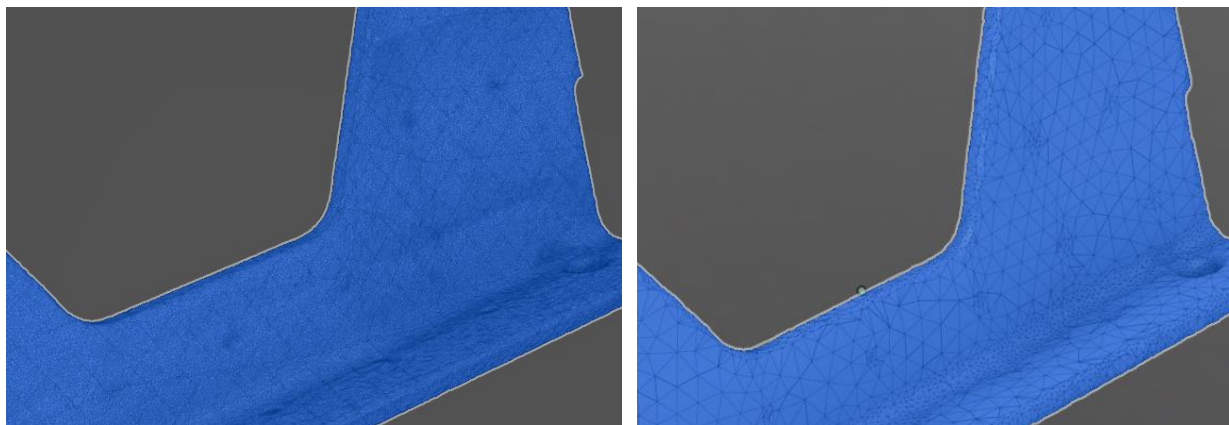


Figura 114: Reducción de la densidad del mallado

Sólo queda darle escala al modelo. Para esto, es especialmente útil la herramienta *Create Mesh Section*, que permite hacer un *sketch* a partir de la intersección de un plano con el modelo.

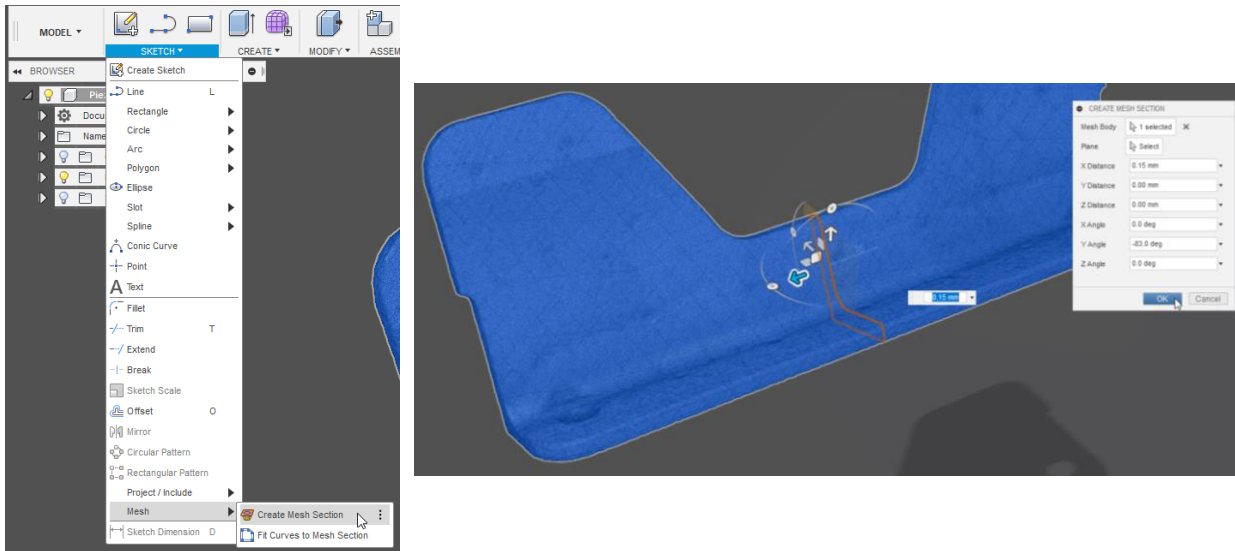


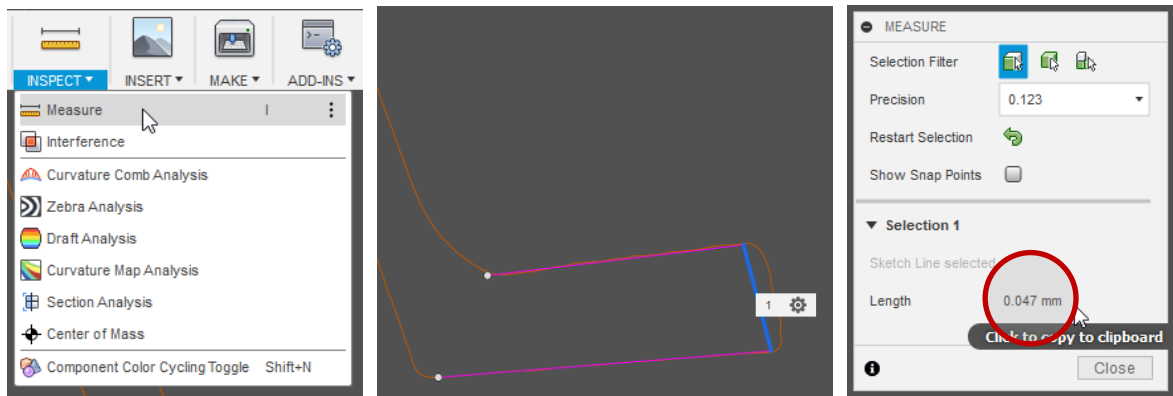
Figura 115: Herramienta *Create Mesh Section*

Con esta operación, se escoge un perfil o elemento del objeto en cuestión que resulte fácilmente medible tanto en el objeto real como en el modelo. En este caso, se ha escogido el espesor de la chapa, de 3mm. Tras crear el *sketch* a partir de la sección, este se puede editar para crear sobre él la geometría que permita medir la dimensión a escalar (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 116: *Sketch* sobre la sección del modelo

De esta manera, es posible medir la dimensión en cuestión sobre el sketch (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

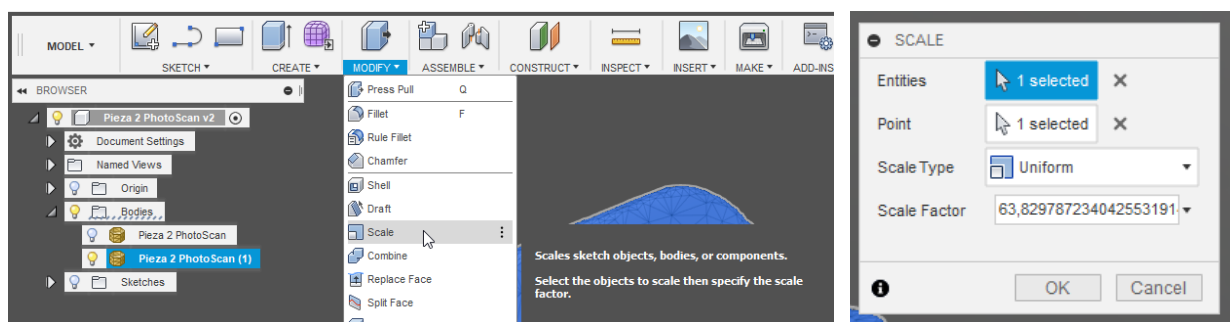


Figura 117: Herramienta *Measure*

Con dicha información es posible calcular el factor de escala necesario para transformar el modelo a escala 1:1:

$$\text{Factor de escala} = \frac{\text{Medida real}}{\text{Medida modelo}}$$

Se pasa así a escalar el modelo según dicho factor de escala utilizando la herramienta *Scale* del menú *Modify*.

Figura 118: Herramienta *Scale*

Con el mallado cerrado y escalado, ya se puede exportar como formato .stl para trabajar con él en el entorno de CATIA.

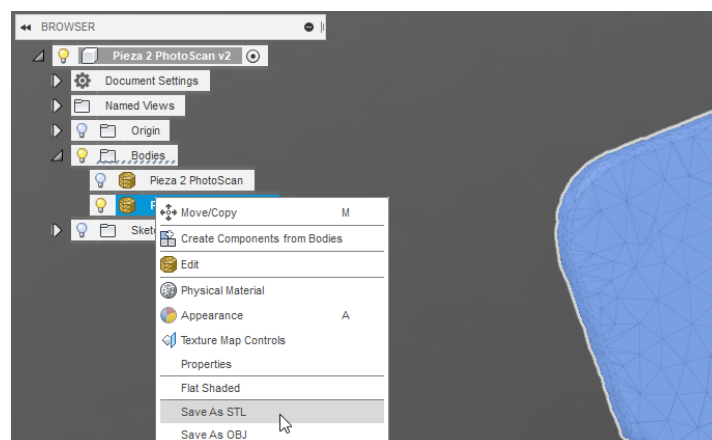


Figura 119: Importación del mallado como archivo .stl

Una vez en CATIA, es necesario comenzar importando el mallado. Desde el módulo *Assembly Design*, se añade como componente a la composición desde el menú *Product Structure Tools*.



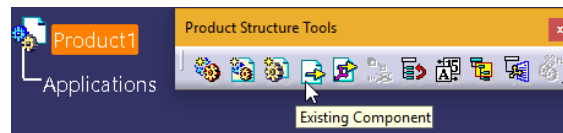


Figura 120: Importación del mallado en el entorno de CATIA

Tras añadir la geometría al *Product 1*, se cambia al módulo *DMU Optimizer* del grupo *Digital Mockup*

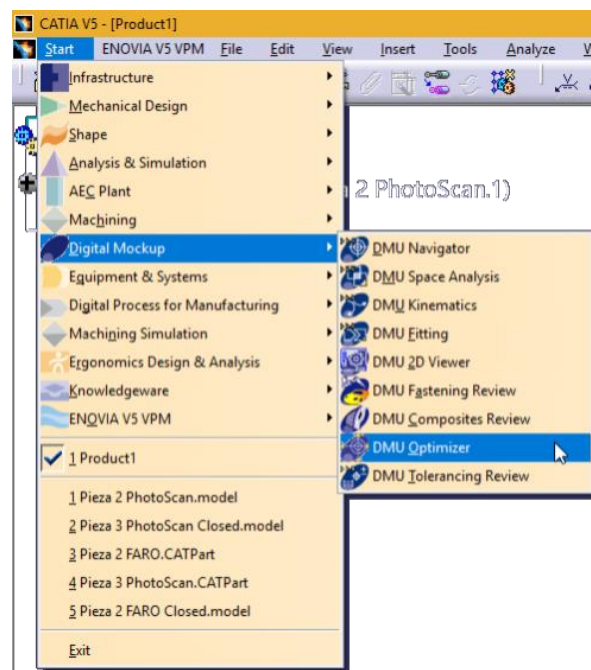


Figura 121: Módulo *DMU Optimizer*

La herramienta *Offset*, destacada con un círculo en la siguiente figura, permite crear un conjunto geométrico de superficies con el formato de trabajo de CATIA a partir del mallado importado.

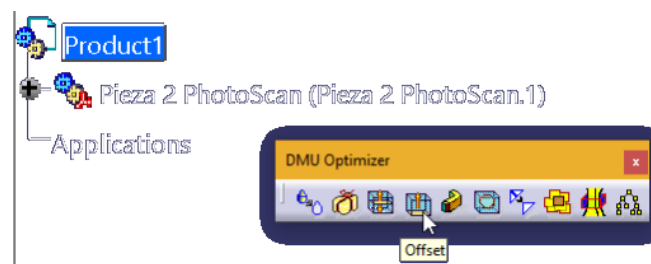


Figura 122: Herramienta *Offset*

Se selecciona el mallado y se guarda con extensión *.model*:

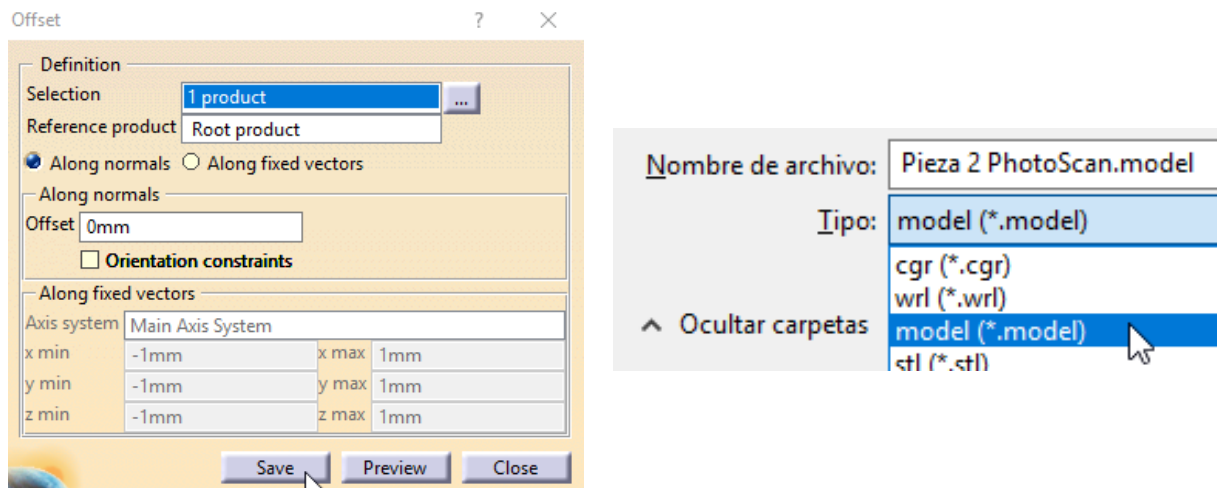


Figura 123: Herramienta *Offset* y ventana de guardado de la geometría resultante

Tras esto se abre el archivo recién guardado (*File* → *Open*) y se copia el árbol *MASTER* del archivo .model. Con esto, se abre un nuevo archivo *CatPart* (*File* → *New* → *Part*) y se pega en él el contenido del archivo .model que se acaba de copiar:

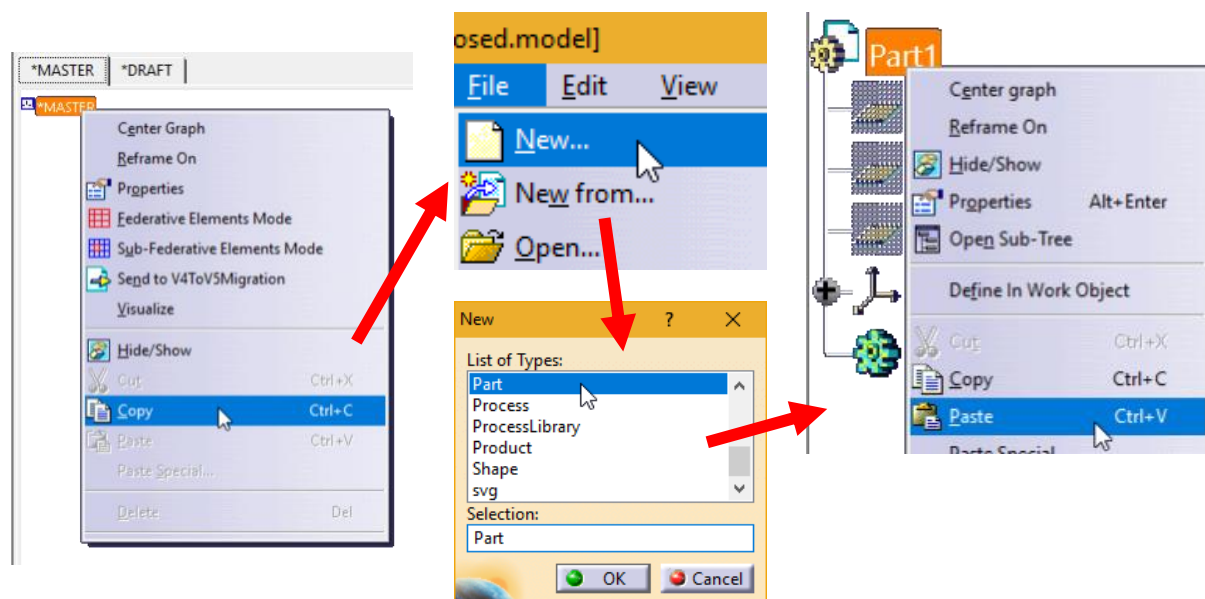


Figura 124: Copia del *MASTER* a un nuevo *CatPart*

Cuando se completa el proceso, el mallado aparece en el árbol de CATIA como un conjunto de superficies sin unir. El siguiente paso es, por tanto, “coser” dichas superficies en una sola entidad. Esto se consigue usando la herramienta *Join* del módulo *Generative Shape Design*. Dentro de la operación, se selecciona el *Geometrical Set* y se inicia el proceso, que puede tardar varios minutos.

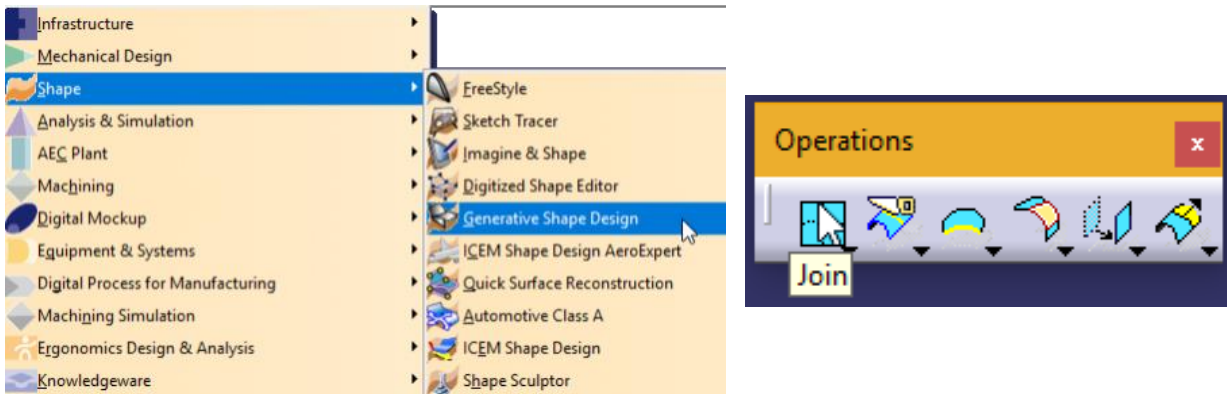


Figura 125: Módulo *Generative Shape Design* (izda.) y herramienta *Join* (dcha.)

Si aparece el siguiente error, puede ser debido a que el mallado consta de varios dominios geométricos. Si algunos de estos dominios son erróneos es necesario eliminarlos desde Fusion 360 y volver a realizar el procedimiento de importación a CATIA. Afortunadamente, CATIA ofrece una visualización de dónde se encuentran dichos errores de cohesión, por lo que pueden ser fácilmente identificados y corregidos.

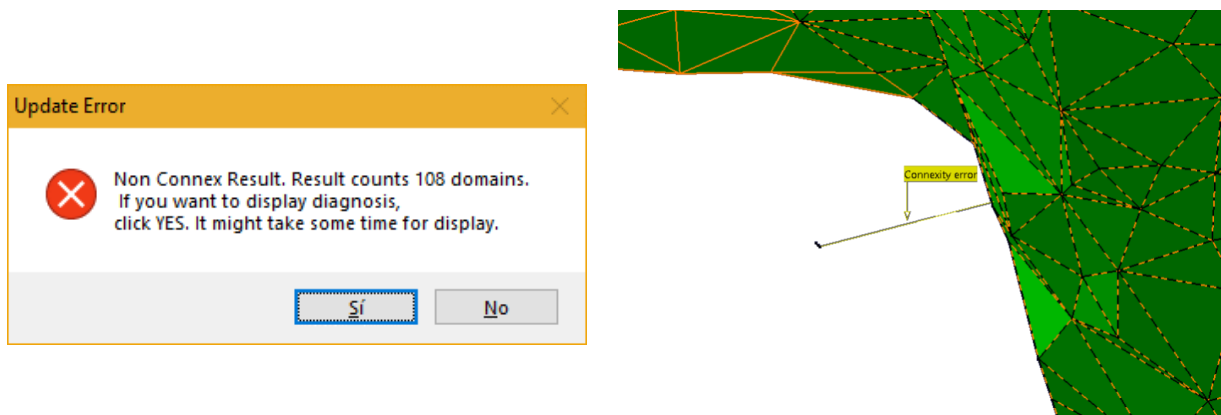
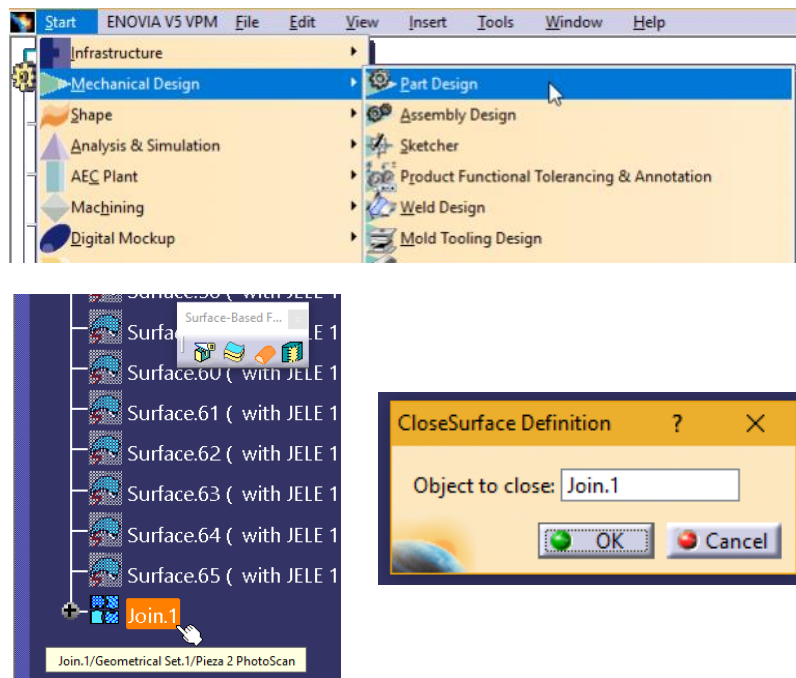
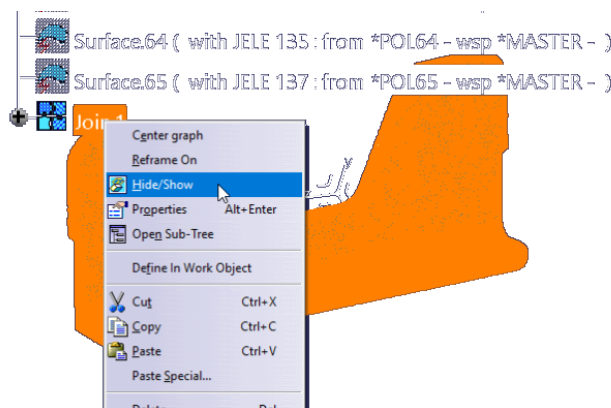


Figura 126: Error de cohesión en el mallado y localización de dominios inconexos

Una vez se tenga el mallado completo ya cerrado y unido en CATIA se puede proceder a solidificar el espacio que este encierra. La herramienta que lleva a cabo esta operación se denomina *Close Surface* y se encuentra en el módulo *Part Design*, dentro del grupo *Mechanical Design*.

Figura 127: Herramienta *Close Surface*

Sólo queda ocultar las superficies agrupadas en el elemento *Join 1* para descubrir el conjunto solidificado:

Figura 128: Se ocultan las superficies en *Join 1* para mostrar el modelo sólido

Se puede comprobar que la pieza ha quedado solidificada haciendo un estudio de su sección:

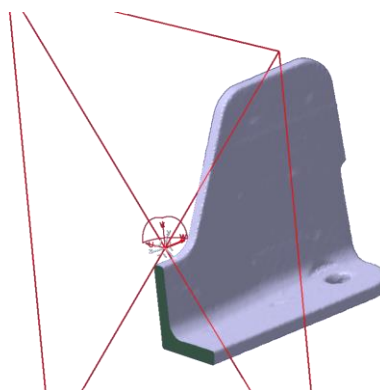


Figura 129: Sección de la pieza en CATIA

## 6.2 Comparativa en CATIA V5

En este apartado se presentan los modelos ya solidificados en CATIA para la comparación de sus masas y centros de gravedad. Las piezas han sido pesadas con una balanza de cocina convencional. No se requiere una mayor precisión de medida, pues simplemente se busca comparar la fidelidad de las piezas entre los distintos tipos de escaneo y no tanto con la pieza real, pues se desconocen las propiedades másicas de las aleaciones en las que están fabricadas.

La masa y el centro de gravedad de los modelos es el calculado por CATIA suponiendo una densidad constante en toda la geometría. El centro de gravedad se representa mediante dos círculos blancos concéntricos en las imágenes.

### 6.2.1 Pieza 1

Para la pieza 1 se ha decidido aplicar aluminio como material en CATIA. En la pieza 1 no se ha llevado a cabo un escaneo con técnicas láser, por lo que se comparan dos modelos obtenidos de forma independiente utilizando PhotoScan. Los resultados obtenidos para la masa y el centro de gravedad son muy similares en ambas iteraciones, asociando las diferencias de masa a las irregularidades que se aprecian en el el agujero mayor que atraviesa la pieza, donde las fotografías no captan con total fidelidad la geometría real del objeto.

Estos son los pesos obtenidos:

	Peso real	PhotoScan Iteración 1	PhotoScan Iteración 2
<b>Masa</b>	237g	231g	226g

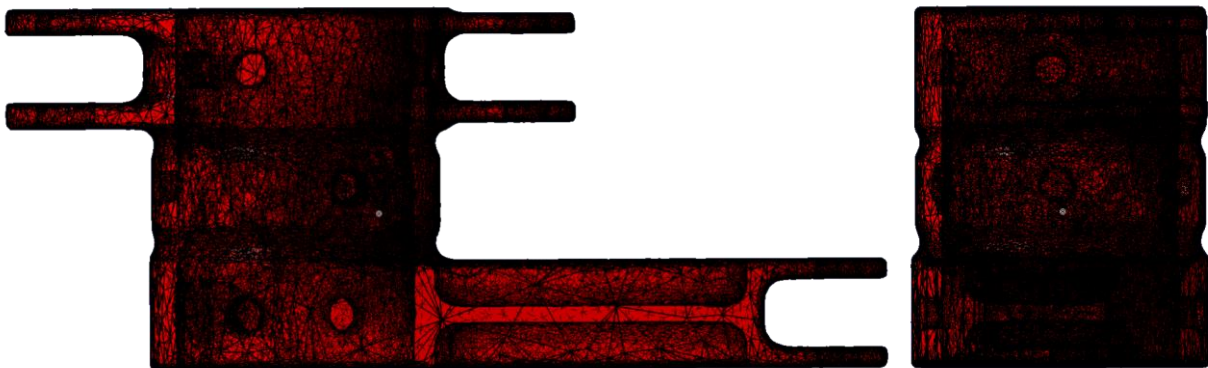


Figura 130: Modelo de una primera iteración en PhotoScan

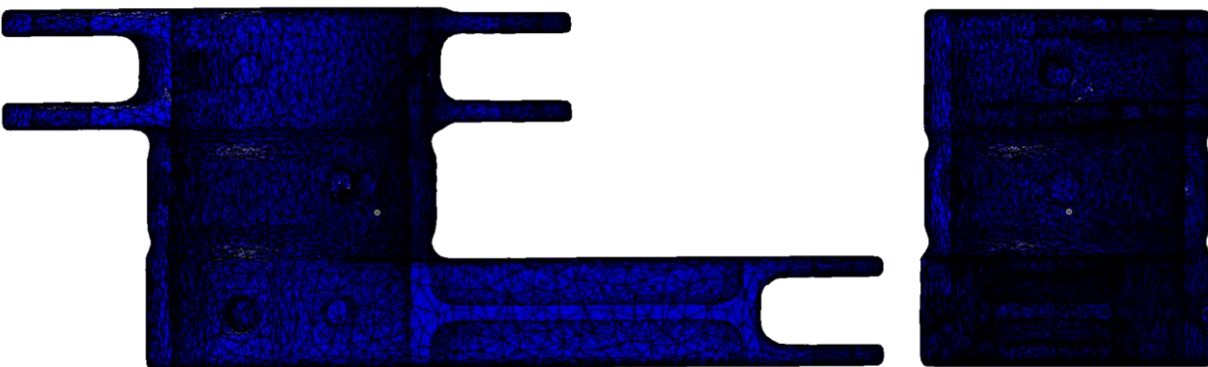


Figura 131: Modelo de una segunda iteración en PhotoScan



### 6.2.2 Pieza 2

Para la pieza 2 también se ha aplicado aluminio como material. En este caso, se pueden apreciar grandes diferencias entre las dos técnicas de escaneado: la fotogrametría (PhotoScan) en rojo y el escaneado láser (FARO Quantum) en azul.

El modelo de PhotoScan ha rellenado los agujeros más pequeños de la pieza al partir de una nube con puntos no deseados en dichas zonas, mientras que en el modelo obtenido mediante escaneado láser estos agujeros han degenerado en huecos mayores y de distinta forma que los reales. Esto es probablemente debido a la lógica del proceso de hacer el mallado un conjunto geométrico cerrado en Fusion360 y a una geometría de partida insuficiente por parte del escaneado láser. Un proceso de reconstrucción de las superficies faltantes de los agujeros podría resolver estos problemas.

Estas particularidades explican la diferencia de pesos entre los dos modelos:

	Peso real	Modelo PhotoScan	Modelo Láser FARO
Masa	66g	64g	59g

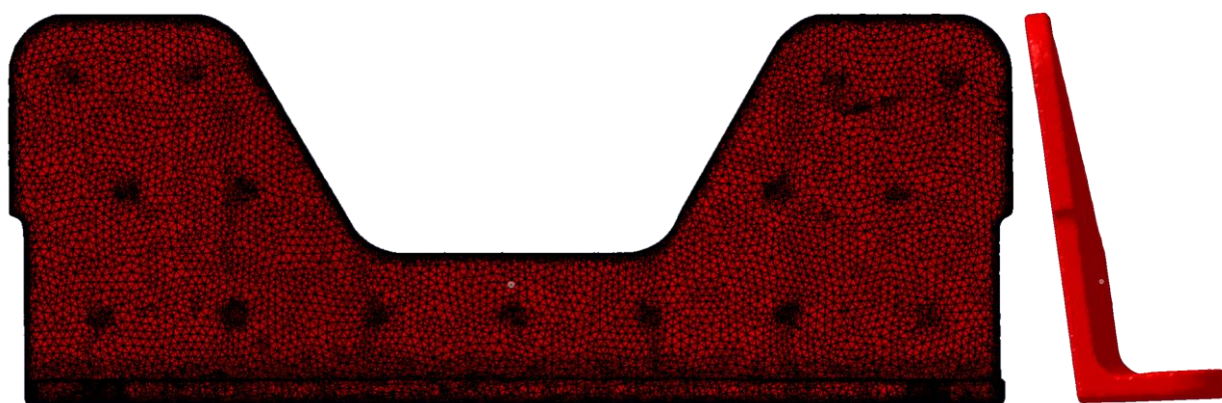


Figura 132: Pieza 2 obtenida desde PhotoScan

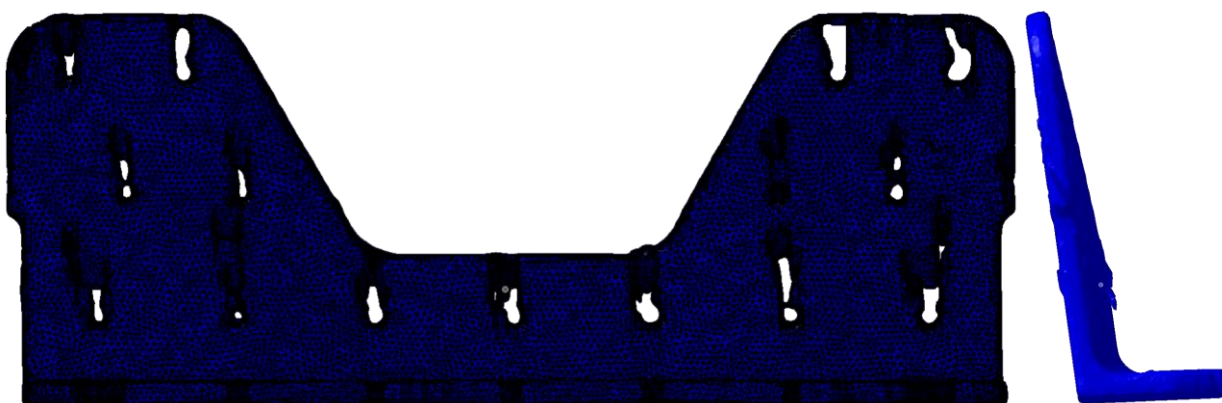


Figura 133: Pieza 2 obtenida mediante el láser FARO Quantum

### 6.2.3 Pieza 3

Para la pieza 3 se ha decidido aplicar acero como material en CATIA. Para esta pieza, el escaneado láser se realiza únicamente barriendo en una sola configuración de la pieza, por lo que se pierde información acerca de la geometría de las zonas que quedan ensombrecidas. Es por esto que se obtienen resultados de gran disparidad en las masas. Aun así, los modelos de ambas técnicas presumen de grandes calidades superficiales y niveles de detalle.

	Peso real	Modelo PhotoScan	Modelo Láser FARO
<b>Masa</b>	213g	255g	218g

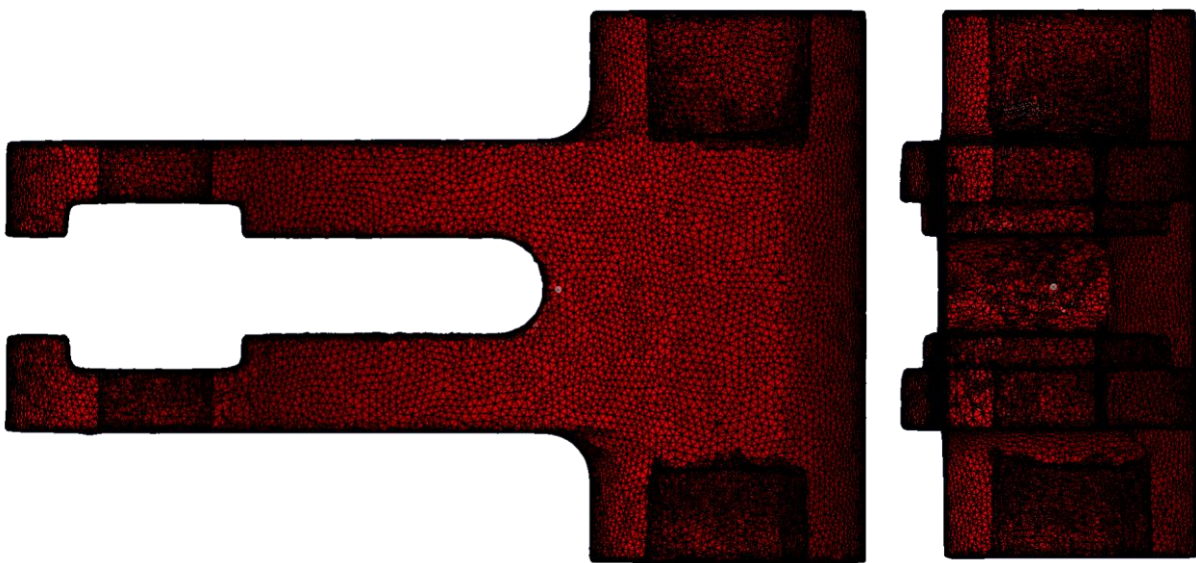


Figura 134: Pieza 3 obtenida desde PhotoScan

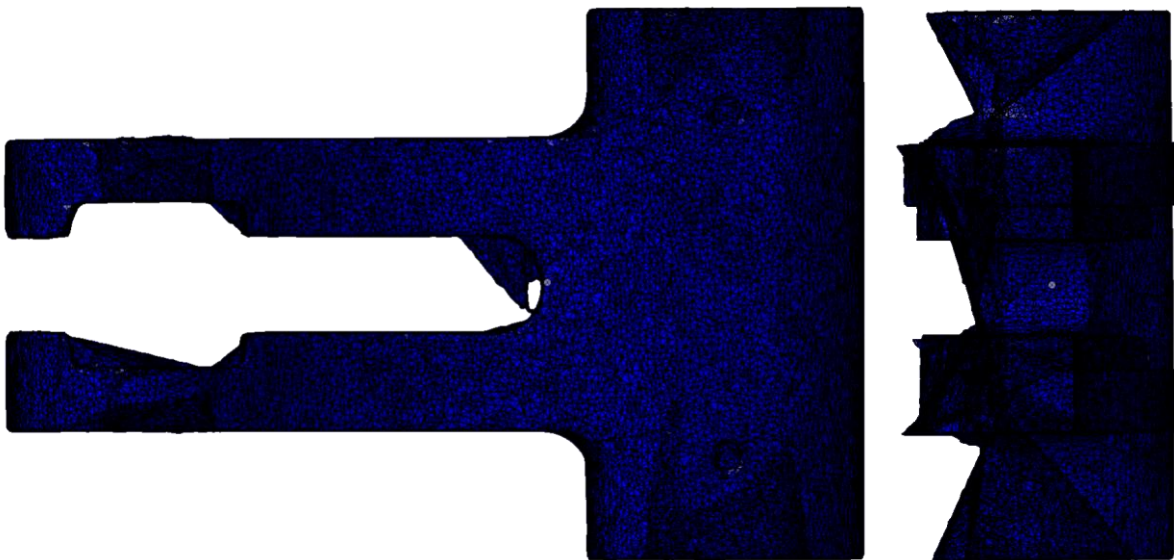


Figura 135: Pieza 3 obtenida mediante el láser FARO Quantum



Para poder comparar los dos modelos al mismo nivel, se ha optado por seccionar ambas piezas por un plano que separe la parte de geometría errónea del modelo generado a partir del mallado del escaneado láser. En este caso sí que se puede decir que las masas obtenidas para ambos modelos son comparables.

	Modelo PhotoScan	Modelo Láser FARO
Masa	110g	112g

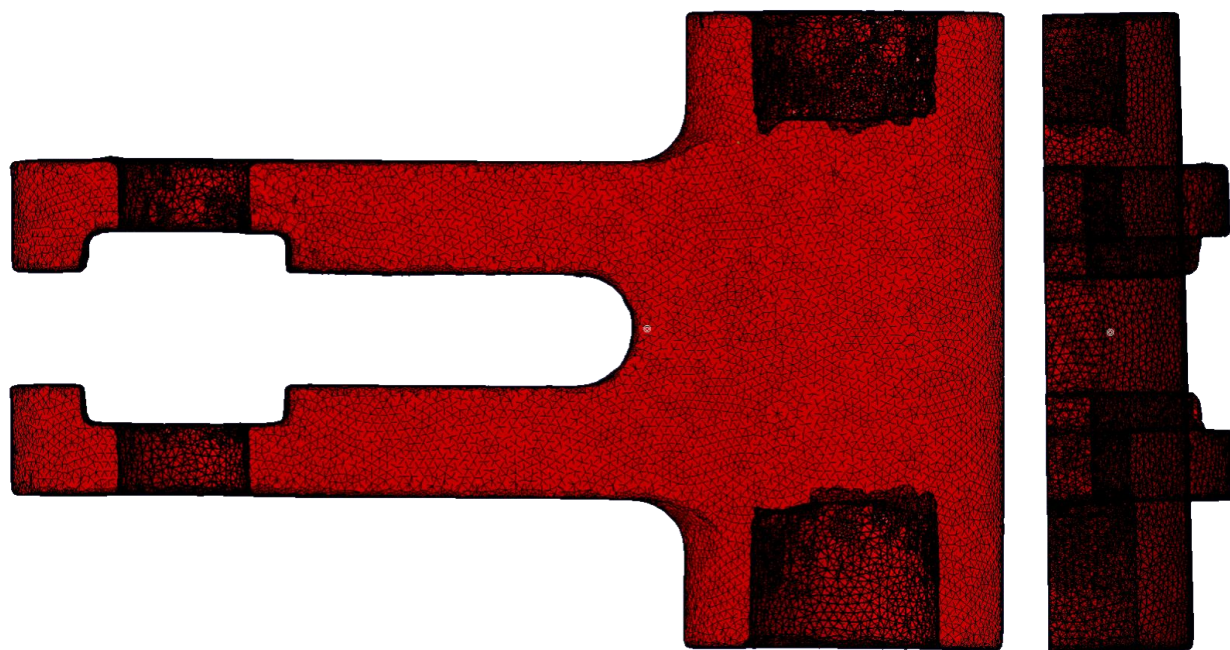


Figura 136: Pieza 3 seccionada obtenida desde PhotoScan

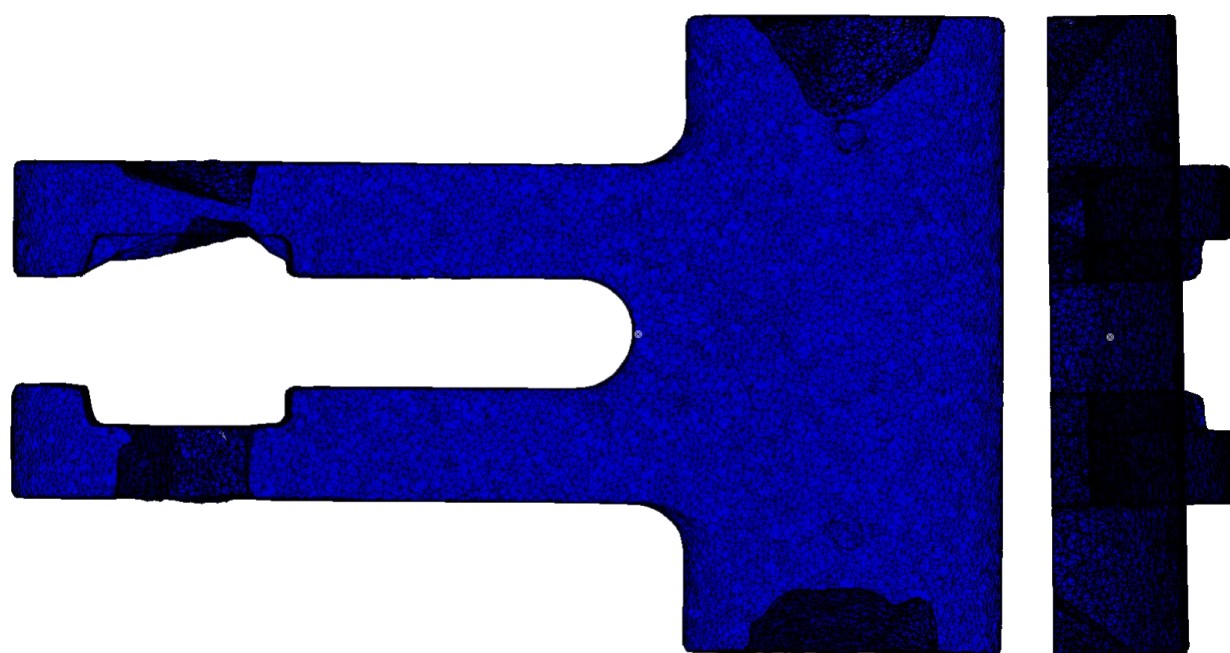


Figura 137: Pieza 3 seccionada obtenida mediante el láser FARO Quantum



## 7 CONCLUSIONES

---

*El placer más noble es el júbilo de comprender.*

*- Leonardo da Vinci -*

Este trabajo ha pretendido ser una primera toma de contacto con las técnicas de fotogrametría, de escaneado y de medición láser. No se ha pretendido profundizar en los aspectos técnicos de ninguno de los anteriores procesos, ni en todas las herramientas que ofrecen, si no que se ha querido marcar un punto inicial para la familiarización con los procedimientos, los medios y el software propio de estos métodos. Tanto una familiarización propiamente mía como la de cualquier lector que dé con este documento buscando esto mismo.

Agisoft PhotoScan ha resultado un software muy atractivo. Posee una interfaz de usuario comprensible y clara, que permite una navegación fácil a través de sus diferentes opciones. Tiene una utilización sencilla y muy intuitiva, y una potencia de cálculo más que admirable, si bien es cierto que requiere de una concienciación y un conocimiento previo de la metodología de trabajo que requiere. La obtención de buenos resultados no es inmediata, si no que requiere de métodos de prueba y error, y es mucho más fácil conseguirlos si se ha trabajado previamente con él. No obstante, aun con un nivel amateur y con medios no especializados para la labor que se pretendía abordar, se han conseguido resultados más que satisfactorios con las piezas que se han realizado íntegramente en PhotoScan.

Realizar el escaneado de las piezas que se muestran en el documento no se consigue en una primera toma de contacto. En una primera iteración del proceso, se intenta utilizar fotografías realizadas con la cámara integrada de un teléfono móvil, y girando la pieza en un fondo estático blanco. Sin embargo, las piezas que se utilizan presentan una superficie sin ningún patrón o detalle que pueda identificar el software, por lo que, aunque probablemente se hubiesen conseguido ciertos resultados aun con la cámara integrada, las características del modelo resultan ser un factor crucial en el proceso de digitalizado.

Así, se opta por pintar la pieza con marcadores permanentes de colores, como se observa en las imágenes del documento, dotando así a la pieza de patrones que el programa pudiese captar. Si se tratase de piezas de color oscuro, donde no se apreciarían las marcas de los marcadores, también se podría espolvorear el modelo con algún tipo de polvo de color claro como polvo de talco o incluso harina. Esto hace que la textura final que se consigue no es la original que tenía el modelo. Si sólo se pretende obtener la geometría del modelo, esto no acarrea ningún problema, pues se prescinde de la textura. Si, por otro lado, la textura original del modelo se pretende conservar en el resultado, se puede crear la textura utilizando fotografías del modelo original, sin modificar. Esto sólo se haría en un último paso tras generar la geometría, de la misma forma que se ha explicado en el documento. Teniendo ya el modelo geométrico, se añaden las fotografías de la pieza sin modificar, se deshabilitan aquellas en las que aparezca la pieza modificada, y se alinean estas primeras con el modelo. Luego simplemente se genera la textura utilizando las fotografías de la pieza virgen, quedando el primer modelo, pero con la textura original de este.

El modelo que resulta de la fotogrametría depende profundamente de las características y la calidad de las fotografías. Es por esto que esta técnica premia la experiencia y unos buenos medios. Como conclusiones principales indicar que:

- Los modelos que se llegan a conseguir pueden tener un gran detalle geométrico, pero pueden ser aun más creíbles para un espectador humano al agregar las texturas de gran resolución y fidelidad que esta técnica consigue captar. Es por esto que, aún en modelos donde intencionadamente se disminuye su cantidad de polígonos, los resultados son fotorrealistas al ojo humano, que es engañado por la textura. No es de extrañar que la técnica sea atractiva para industrias como la del videojuego o el cine, como ya ha sido utilizado por estudios de efectos especiales en diferentes títulos.

Si ahora nos centramos en las comparaciones con los otros acercamientos de escaneado láser que se han abordado al principio de este documento, podemos extraer diferentes conclusiones:

- La primera es que la facilidad y rapidez que ofrece el láser del tipo proporcionado por FARO es realmente remarcable, aunque también requiere de una mayor inversión económica. Además, los resultados obtenidos son los que presentan mayor precisión entre todas las técnicas estudiadas, por lo que resulta ser la opción más indicada para procesos de verificación, comparación y análisis dimensional en un entorno industrial.
- En cuanto a las otras dos técnicas de escaneado láser utilizadas (el láser portátil de mano y el escaneo láser desde estación fija), creo que no son procesos adecuados para la tarea que se ha intentado abordar en este trabajo. El láser de mano presenta la ventaja de ser portátil y registrar considerables cantidades de puntos en grandes ángulos de captura, como se puede comprobar en el apartado 3.2.3, por lo que resulta de especial utilidad a la hora de recoger nubes de puntos de zonas con varias cavidades o salas, como cuevas o edificios, o que requieran de la captación de puntos desde varios lugares o contengan elementos que obstruyan el campo de visión, como pueden ser plantaciones. Sin embargo, es la técnica cuyas nubes de puntos son menos precisas, aunque pueden intuir grandes volúmenes.
- El caso del escaneado desde la estación fija presenta una precisión en los puntos adquiridos mayor que el caso del escáner portátil, aunque sin llegar a la conseguida en el caso del escáner FARO. Es por eso es posible encontrar esta técnica en estudios topográficos o de edificios, que no requieran demasiados movimientos de la estación para su ejecución.

## REFERENCIAS

- [1] B. Breuckmann, «25 Years of High Definition 3D Scanning: History, State of the Art, Outlook,» *The British Computer Society*.
- [2] Wikipedia, «Structure from motion,» 2018. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Structure\\_from\\_motion](https://es.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion).
- [3] Steve's Digicam, «Aerial photogrammetry,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.steves-digicams.com/knowledge-center/how-tos/photography-tips/what-is-aerial-photogrammetry.html#b>.
- [4] Salento Droni, «Aerial photogrammetry,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.salentodroni.com/en/services/aerial-photogrammetry>. [Último acceso: 20 Octubre 2018].
- [5] PIX4D, «rayCloud: the power of understanding photogrammetry,» 20 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.pix4d.com/blog/raycloud-power-understanding-photogrammetry>. [Último acceso: 17 Octubre 2018].
- [6] P. Paul R. Wolf, P. Bon A. Dewitt y P. Benjamin E. Wilkinson, «Terrestrial and Close-Range Photogrammetry,» de *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, McGraw-Hill Professional, 2014.
- [7] Grupo de Investigación: Sistemas Fotogramétricos y Topométricos, «Universidad de Jaén,» Febrero 2012. [En línea]. Available: <https://coello.ujaen.es/investigacion/websft/instrumental.html>. [Último acceso: 17 Octubre 2018].
- [8] Topoequipos, «¿Qué es fotogrametría?,» [En línea]. Available: <http://www.topoequipos.com/dem/que-es/terminologia/que-es-fotogrametria>.
- [9] Wikipedia, «Photogrammetry,» 2018. [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry>.
- [10] Christina, «A Brief History of 3D Scanning,» *Matter and Form*, 2014.
- [11] B. B. O'Neal, «Smart3D: Perceptron Releases Comprehensive, Portable 3D Laser Scanning System and Software,» 6 Mar 2015. [En línea]. Available: <https://3dprint.com/49306/smart3d-perceptron-scanning/>. [Último acceso: 2018 10 20].
- [12] S. Lachambre, S. Lagarde y C. Jover, «Unity: Photogrammetry Workflow,» *Unity*, 2017.
- [13] Agisoft LLC, «Agisoft,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.agisoft.com/>.
- [14] FARO Technologies, «Página web promocional de FARO,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.faro.com>.
- [15] Leica Geosystemes, «Página web promocional de Leica,» 2018. [En línea]. Available: <https://leica-geosystems.com>.
- [16] ALLTERRA, «Mobile Mapping | ZEB-REVO Solution,» [En línea]. Available: <https://allterra->

dno.de/mobile-mapping-zeb-revo/.

- [17] utb, «GeoSlam ZEB REVO Surveying - Mobile Scanner,» [En línea]. Available: <https://www.u-tb.at/at/geoslam-scanner-zeb-revo.html#.W9yKvJNKiUk>.
- [18] R. Tilbury, «Interview with Infinite-Realities,» *IR-Ltd*, 2012.
- [19] Agisoft LLC, «3D Model Reconstruction with Agisoft PhotoScan 1.1,» [En línea]. Available: [http://www.agisoft.com/pdf/PS\\_1.1%20-Tutorial%20\(BL\)%20-%203D-model.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.1%20-Tutorial%20(BL)%20-%203D-model.pdf).
- [20] Agisoft LLC, «Agisoft PhotoScan User Manual: Standard Edition, Version 1.0,» 2012. [En línea].
- [21] «Urban Modelling Equipment,» *UCD School of Civil Engineering*, 2016.
- [22] J. Mings, «Scan Your Cave, Model it in modo, Call It a Day,» *SolidSmack*, 2010.
- [23] SCS - The Survey Equipment Company, «GeoSlam ZEB REVO handheld laser scanner,» YouTube, 2017. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=sKmBUoT1hJc>.
- [24] S. T. Porter, M. Roussel y M. Soressi, «A Simple Photogrammetry Rig for the Reliable Creation of 3D Artifact Models in the Field: Lithic Examples from the Early Upper Paleolithic Sequence of Les Cottés (France),» *University of Minnesota*, 2016.
- [25] A. Aragón, «¿Fotogrametría de objeto cercano o Láser escáner? La eterna duda en el modelado 3D,» *SRMconsulting*, 2018.
- [26] «arvids hjemmeside F-5 A/B/RF-5 (General Electric J85-GE-13),» 2018. [En línea]. Available: <https://arvidlille.com/aircraft-engines/f-5-abrf-5-general-electric-j85-ge-13/>.
- [27] Shining 3D Tech, «Página web promocional de Shining 3D,» [En línea]. Available: [http://en.shining3d.com/digitizer\\_detail-4476.html#](http://en.shining3d.com/digitizer_detail-4476.html#). [Último acceso: 2018 10 20].